

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Využití telekomunikačního optického vlákna jako vláknově
optického senzoru**

**Utilization telecommunication optic fiber
as a fiber optic sensor**

Rok 2012

Jan Benbenek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Benbenek**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Využití telekomunikačního optického vlákna jako vláknově optického senzoru
Utilization telecommunication optic fiber as a fiber optic sensor

Zásady pro vypracování:

Cílem je vytvoření souboru vláknově optických senzorů s použitím standardního telekomunikačního vlákna a analýza jejich využitelnosti v průmyslu.

1. Popis principů a rozdělení zdrojů a detektorů optického záření.
2. Optická vlákna. Rozdělení, materiálové složení, jejich vlastnosti a parametry.
3. Vláknově optické senzory. Princip a základní rozdělení.
4. Intenzitní vláknově optické senzory.
5. Realizace vlastních vláknově optických senzorů a jejich proměření.
6. Vyhodnocení měření a analýza použitelnosti souboru senzorů v průmyslu.

Seznam doporučené odborné literatury:

LOPEZ-HIGUERA, J.M. *Handbook of Fibre Optics sensing technology*. Chichester : John Wiley & Sons, 2002. 765 s. ISBN 0-471-82053-9.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha : MATFYZ-press, 1994-96. 800 s. ISBN 80-85863-05-7.

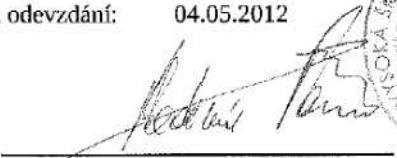
UDD, Eric. *Fiber Optics Sensors : An Introduction For Engineers And Scientists*. Chichester : John Wiley & Sons, 1991. 496 s. ISBN 0-471-83007-0.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Hanáček**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty



Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 30.4.2012

Buloch
.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval panu *ing. Františku Hanáčkovi, Phd.* za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou vláknově optických senzorů a jejich praktickým uplatněním v průmyslu. VOS se již řadu let využívají ke snímání různých druhů fyzikálních veličin. Hlavní princip senzorů spočívá v modulaci přenášeného světelného signálu optickým vláknem, určitou fyzikální veličinou. Vlastnosti optických vláken tedy určují celkovou charakteristiku VOS.

Účelem práce je nejprve provést teoretický rozbor VOS, základních optoelektronických součástí a v praktické části navrhnout měřicí systém využívající telekomunikační optické vlákno, ke snímání působícího vlivu určité fyzikální veličiny. Realizovaný systém poté zhodnotit a uvést případné využití v průmyslu.

Klíčová slova

Optická vlákna, Vláknově optický senzor, Intenzitní vláknově optický senzor, Optický zdroj, Fotodetektor

Abstract

The bachelor thesis deals with issue of fiber optic sensors and their practical application in industry. FOS is used to sensing different kind of physical magnitudes for many years. The main principle of the sensors consists in modulation of the transmitted light signal of the certain physical magnitude, through an optical fiber. Properties of optical fibers determines the overall characteristics of the sensors.

The main purpose of the thesis is performed a theoretical analysis of fiber optic sensors and their basic optoelectronic parts. In the practical part design a measurement system utilizing of the telecommunication fiber optic to sensing the impact of an acting physical measurand. The implemented system will then evaluate and its indicate possible applications in industry.

Key words

Optical fiber, Fiber Optic Sensor, Intensity Fiber Optic Sensor, Optical Source, Photodetectors

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	Napětí
α_c	°	Mezní úhel
n_1	-	Index lomu jádra
n_2	-	Index lomu pláště
n_0	-	Index lomu okolního prostředí
α_x	°	Maximální úhel dopadu
Δt_{SI}	$ns.km^{-1}$	Vidová disperze pro SI vlákno
L	km	Délka vlákna
c	$km.s^{-1}$	Rychlost světla
Δt_{GI}	$ns.km^{-1}$	Vidová disperze pro GI vlákno
A	dB	Útlum optického vlákna
P_1	W	Vstupní výkon
P_2	W	Výstupní výkon
a	$dB.km^{-1}$	Měrný útlum
V	-	Normalizovaná frekvence
d	m	Průměr jádra vlákna
λ	m	Vlnová délka
F	N	Síla
m	kg	Hmotnost
g	$m.s^{-2}$	Gravitační zrychlení
x	dB	Průměrná hodnota útlumu
n	-	Počet měření senzoru
O_m	dB	Maximální vyšší odchylka

O_n	dB	Maximální nižší odchylka
T	dB	Tolerance chyb
Δ	-	Absolutní chyba
Δx_m	dB	Rozsah průměrných hodnot útlumů
Δx_{id}	dB	Rozsah ideálních hodnot útlumů
δ	%	Relativní chyba senzoru
k_n	$dB.N^{-1}$	Citlivost
Δb	dB	Velikost změny útlumu
ΔF	N	Velikost změny síly
k	-	Koeficient rozšíření
u_A	dB	Standardní nejistota typu A
R_{c_n}	m	Kritický poloměr ohybu
ε	-	Emisivita

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
VOS	Fiber Optic Sensor	Vláknově optický senzor
EMI	Electromagnetic interference	Elektromagnetická interference
LAN	Local Area Network	Lokální počítačová síť
WAN	Wide Area Network	Rozlehlá počítačová síť
NA	Numeric Aperture	Numerická apertura
SI	Step Index	Skoková změna
GI	Graded Index	Postupná změna
OH	Oxide Hydroxide	Hydroxid
SiO ₂	Silicon Dioxide	Oxid křemičitý
SMF	Single Mode Fiber	Jednovidové vlákno
MMF	Multimode Fiber	Mnohovidové vlákno
LED	Light Emitting Diode	Dioda se světelnou emisí
ST	Straight Tip	Přímý konec
SMA	Subminiature Assembly	Subminiaturní montáž
FC	Fiber Connector	Vláknový konektor
MU	Miniature Unit	Miniaturní jednotka
SC	Subscriber Connector	Účastnický konektor
FOS	Fiber Optic Sensor	Vláknově optický senzor
OFS	Optical Fiber Sensor	Optický vláknový senzor
GaAs	Gallium Arsenit	Sloučenina gália a arsenitu
InGaP	Indium gallium phosphorus	Sloučenina india, gália a fosforu
GaAlAs	Gallium Alluminium Arsenit	Sloučenina gália, hliníku a arsenitu
PSZ	Semiconductor Light Sources	Polovodičové světelné zdroje
IR	Infrared	Infračervená oblast

Si	silicon dioxide	Křemík
Ge	Germanium	Germánium
PN	Positive-Negative	Přechod pozitivní-negativní
PIN	Positive – Intrinsic-Negative	Dioda s vloženým přechodem mezi pozitivní a negativní přechod
APD	Avalanche photodiode	Lavinová fotodioda
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová linka

Obsah

<u>1</u>	<u>Úvod.....</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>Optická vlákna.....</u>	<u>2</u>
2.1	Princip optického vlákna	2
2.2	Parametry optických vláken	3
2.2.1	Šířka pásma optického vlákna	3
2.2.2	Numerická apertura(NA)	4
2.2.3	Disperze	4
2.2.4	Vidová disperze	5
2.2.5	Chromatická disperze	6
2.2.6	Polarizační vidová disperze:	7
2.2.7	Útlum světelného signálu v optickém vlákně.....	7
2.2.8	Ohyby optického vlákna.....	7
2.2.9	Mikroohyby vlákna	8
2.2.10	Absorpce.....	9
2.2.11	Rozptylové ztráty.....	9
2.3	Typy optických vláken	9
2.3.1	Jednovidová vlákna (Single Mode Fibers SMF)	10
2.3.2	Mnohovidová vlákna (Multi Mode Fibers MMF)	11
2.3.3	Vlákna se skokovou změnou indexu lomu	11
2.3.4	Vlákna s gradientní změnou indexu lomu	12
2.3.5	Porovnání jednovidových a mnohovidových vláken.....	13
<u>3</u>	<u>Spojování optických vláken.....</u>	<u>14</u>
3.1	Svařování optických vláken	14
3.2	Rozebíratelné optické konektory	14
3.3	Konektory	15
<u>4</u>	<u>Vláknově optické senzory</u>	<u>16</u>

4.1	Optický senzor.....	16
4.2	Rozdělení vláknově optických senzorů.....	17
4.2.1	Oblasti a druhy měřených veličin.....	17
4.2.2	Prostorové rozložení měřené veličiny	17
4.2.3	Povaha snímání.....	18
4.2.4	Modulace měřené veličiny.....	19
4.3	Intenzitní vláknově optické senzory	20
4.3.1	Přenosový intenzitní VOS	20
4.3.2	VOS založené na ohybu optického vlákna	21
4.3.3	Teplotní senzory	21
5	<u>Optické zdroje.....</u>	22
5.1	LED diody	22
5.2	Lasery	23
6	<u>Fotodetektory.....</u>	25
6.1	Vlastnosti fotodetektoru	25
6.2	Materiály a druhy fotodetektorů.....	25
6.2.1	Fotodioda PIN	26
6.2.2	Lavinová fotodioda APD (avalanche photodiode)	27
7	<u>Realizace intenzitního makroohybového VOS</u>	28
7.1	Schéma zapojení, použité přístroje:	28
7.2	Popis jednotlivých částí makroohybového senzoru:	30
7.3	Postup měření.....	31
7.4	Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, grafy.....	32
7.5	Zhodnocení:.....	36
8	<u>Spolupráce na měření vlnového spektra intenzitního VOS pro vysoké teploty.....</u>	39
8.1	Postup měření:	39
8.2	Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, grafy:	40
8.3	Zhodnocení.....	41

<u>9</u>	<u>Vyhodnocení a praktické využití realizovaných senzorů.....</u>	<u>42</u>
	<u>Použitá literatura.....</u>	<u>xliv</u>
	<u>Přílohy</u>	<u>xlvi</u>
	<u>Seznam příloh</u>	<u>xlvii</u>

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je provést teoretický rozbor vláknově optických senzorů, optoelektronických součástí nutných k jejich činnosti a v praktické části navrhnout VOS využívající konvenční telekomunikační optické vlákno ke snímání určité fyzikální veličiny. Práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části jsou vysvětleny základní principy, rozdělení a parametry optických vláken využívaných VOS. Z důvodu použití optického svaru při spojování optických vláken v praktické realizaci senzoru, je zde zahrnuta kapitola zabývající se spojováním optických vláken a optickými konektory. Dále je definován pojem VOS a hlavní rozdělení senzorů. Významnou skupinou VOS, jejichž funkčnost a teoretické předpoklady byly ověřeny v praktické části, jsou intenzitní senzory. V posledních dvou kapitolách teoretické části jsou popsány optické zdroje a detektory, které zajišťují funkci VOS.

Praktická část se skládá ze dvou částí:

- vlastní realizaci makroohybového intenzitního VOS pro snímání síly
- spolupráci na měření intenzitního VOS pro snímání vysokých teplot

Celý návrh a realizace makroohybového senzoru je zpracován formou protokolu. V úvodu je vysvětlena základní charakteristika senzoru. V další části protokolu jsou zobrazena schémata zkonstruovaného senzoru, na kterých je vysvětlena funkce jednotlivých částí. Příklad naměřených a vypočtených hodnot je uveden pouze pro dvojné tažení vlákna. Zbývající naměřené a vypočtené hodnoty, tabulky a grafy jsou uvedeny v příloze. Ve zhodnocení jsou shrnuty a vysvětleny dosažené výsledky měření. Stejným způsobem je zpracováno měření intenzitního senzoru pro vysoké teploty. Možnosti použitelnosti v průmyslu a celková sumarizace naměřených výsledků u obou senzorů je vyhodnocena v závěru.

2 Optická vlákna

Optická vlákna jsou světlovody, které přenášejí optické záření od začátku vlákna až na jeho konec. Optické vlákno je nejdůležitější součástí ve vláknově optických komunikačních a senzorových systémech. Vedení světla v optickém vlákně je založené na totálním vnitřním odrazu mezi jádrem a pláštěm.[1,2]

Výhody optických vláken:[1]

- velmi vysoké přenosové rychlosti na velké vzdálenosti
- linearita
- použitím optických vláken zvyšujeme spolehlivost přenosových systému
- vysoká odolnost vůči různým druhům rušení EMI, netečné
- díky malému útlumu vláken je možné přenášet optický signál na velké vzdálenosti
- malé rozměry a hmotnost zajišťují snadnou manipulaci s vlákny

Využití optických vláken:[1]

-telekomunikační sítě, v průmyslu, zdravotnictví, součást komunikačních systému (sítě LAN a WAN), letectví, kosmonautika, automobilový průmysl, armáda, vláknově optické senzory atd.

2.1 Princip optického vlákna

Optické vlákno se skládá z jádra a pláště, které jsou vyrobeny z materiálu SiO_2 . Optické záření se šíří vnitřní vrstvou jádrem. Optické vlny (paprsky) se odrážejí od pláště a tím jsou udržovány v jádře vlákna. Rozsah vlnových délek, pro které je vlákno vyráběno je dáno materiálem jádra a pláště.[1,3]

Základními složkami vlákna jsou jádro a plášť, které mají přesně definované optické vlastnosti a jsou určeny k přenosu světelného signálu. [1]

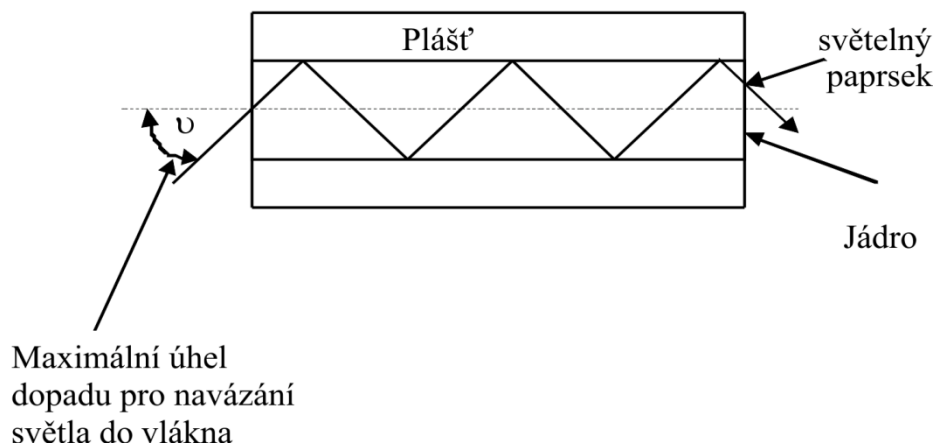
Primární ochrana-používá se jako ochrana proti různým druhům mechanického poškození, umožňuje ohýbání skleněných vláken.[1]

Index lomu

Popisuje změnu rychlosti šíření světla při přechodu mezi různými prostředími. Index lomu jádra je větší než pláště. Opticky hustším prostředím označujeme prostředí s větším indexem lomu. Optické vlákno využívá k přenosu tzv. úplný odraz světla od rozhraní dvou prostředí. K úplnému odrazu dojde tehdy, když paprsek po dopadu na rozhraní z prostředí hustšího, na řidší překročí mezní úhel a tím dojde k úplnému odrazu. Podmínkou činnosti optických vláken je, aby index lomu jádra byl větší než pláště.[1]

Mezní úhel [1]

Je největší možný úhel dopadu, při kterém ještě nastává lom světla. Je-li úhel dopadu větší než mezní úhel dochází k totálnímu odrazu. [1]



Obrázek 2.1 Přenos světelného paprsku optickým vláknem[1]

$$\alpha_c = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} \quad (2.1)$$

α_c mezní úhel [1]

n_2 -index lomu pláště

n_1 -index lomu jádra

2.2 Parametry optických vláken

-šířka pásma, numerická apertura(NA), disperze, útlum(dB), minimální poloměr ohybu, absorpce, rozptyly[1]

2.2.1 Šířka pásma optického vlákna

Přenosová kapacita optického vlákna přenášejícího optické signály. U mnohovidových vláken je určena vidovým zkreslením, udává se v MHz.km⁻¹. [13]

Šířku pásma ovlivňují tyto faktory: [1]

Konstrukční uspořádání, materiál optického vlákna, vlnová délka optického signálu. Např. vlákno, které má na vlnové délce 850 nm šířku pásma 160MHz.km, může mít na vlnové délce 1300nm šířku pásma 500MHz.km. S vlnovou délkou se mění také útlum vlákna.

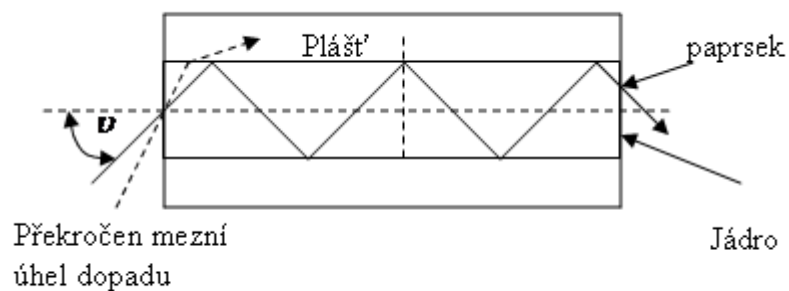
2.2.2 Numerická apertura(NA)

Rozmezí vstupních úhlů světelných paprsků směřujících do jádra, které budou jádrem přeneseny. NA je rovna sinu maximálního úhlu α_x , pod kterým se budou vstupující paprsky šířit od začátku vlákna. [1]

$$NA = \frac{1}{n_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_0 \sin \alpha_x. \quad (2.2)$$

NA – numerická apertura [1]:

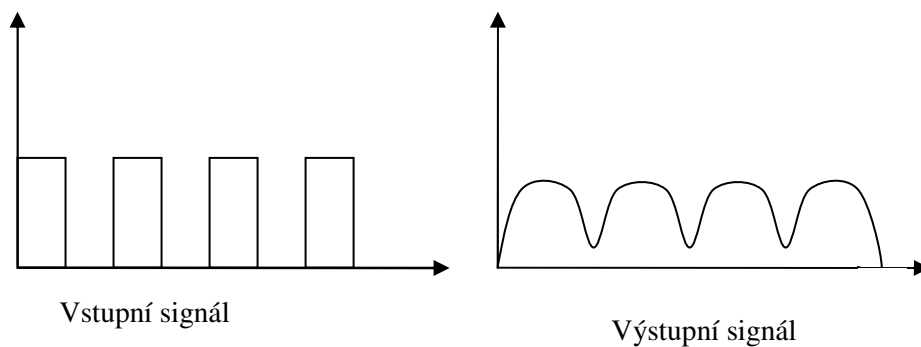
- n_0 je index lomu okolního prostředí (nejčastěji vzduch)
- n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště
- α_x je maximální úhel dopadu na navázání světla do vlákna



Obrázek 2.2 Vliv numerické apertury[1]

2.2.3 Disperze

Způsobuje změnu tvaru přijímaného optického signálu a dělí se na tyto základní části: -vidová disperze, chromatická disperze, polarizační disperze.[1]



Obrázek 2.3 Vliv disperze na přenášený optický signál[1]

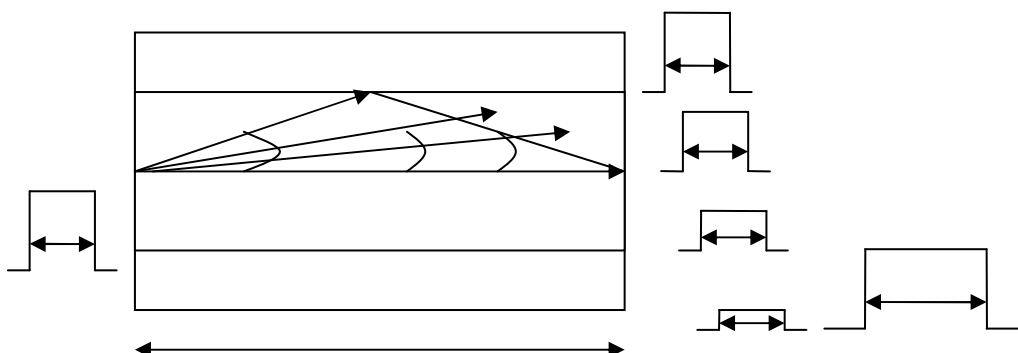
2.2.4 Vidová disperze

Vyskytuje se u mnohovidových vláken. Z důvodu rozdílných drah paprsků šířících se optickým vláknem, dorazí jednotlivé paprsky na konec vlákna v různých časových úsecích. Proto se přenesený impulz na konci vlákna bude lišit tvarem i amplitudou od vstupního impulzu. Projevuje se hlavně při přenosu na větší vzdálenosti. Omezuje počet impulzů vyslané v určitém čase. Při větší vzdálenosti než 1 km jsou různé paprsky (vidy) přeneseny na konec vedení v rozdílném časovém intervalu. Např. vyslané obdélníkové impulzy budou na výstupu zkresleny obr.2.4 (řada širších výstupních impulzů, zmenšená amplituda, navzájem překryty). [1]

Různá omezení díky vidové disperzi:

Mezní šířka pásma, přenosová rychlost, vzdálenost na kterou budeme přenášet, impulzy nemohou mít libovolně vysoký kmitočet z důvodu jejich detekce na výstupu. [4]

Vidovou disperzi zmírníme uspořádáním vlákna, použitím vláken s gradientní změnou indexu lomu. Úplného odstranění dosáhneme použitím jednovidových vláken. [4]



Obrázek 2.4 Vidová disperze a její působení na přenášený optický signál

Pro optická vlákna SI se vypočítá vidová disperze: [4]

$$\Delta t_{SI} = \frac{L \cdot NA^2}{2 \cdot n_1 \cdot c} [ns \cdot km^{-1}]. \quad (2.3)$$

L - délka vlákna (km)

NA - numerická apertura

n_1 - index lomu jádra

c – rychlost světla ($km \cdot s^{-1}$)

Pro optická vlákna GI se vypočítá vidová disperze: [4]

$$\Delta t_{GI} = \frac{L.NA^4}{8.n_1^3.c} [ns.km^{-1}]. \quad (2.4)$$

2.2.5 Chromatická disperze

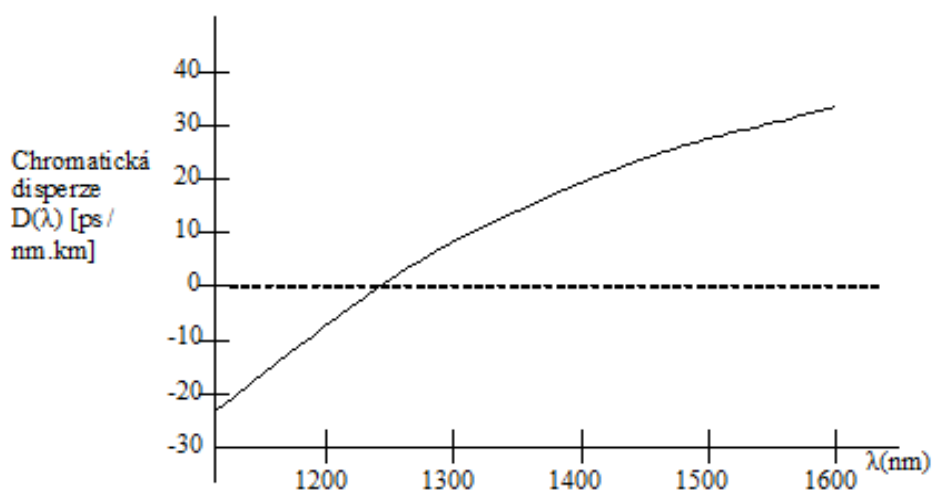
Použité zdroje optického záření nejsou dokonale monochromatické, vyzařované optické záření obsahuje spektrum vlnových délek. Každá složka spektra má specifickou rychlost šíření ve vláknu. Důsledkem je, že jednotlivé složky spektra dorazí na konec vlákna v různém časovém úseku. Rozdíly ve zpoždění jsou způsobeny disperzními vlastnostmi vlnovodného materiálu (materiálová disperze) a také vlivem vedení uvnitř struktury optického vlákna (vlnovodná disperze). Fyzikálně se jedná o rozšíření signálu v pikosekundách, po průchodu impulzu vláknem o délce 1 km, při použití zdroje se spektrální pološířkou 1 nm. Chromatická disperze se objevuje u všech typů optických vláken obr.2.5.[1,3,4]

Chromatická disperze omezuje:[4]

- a) šířku kmitočtového pásma vlákna
- b) vzdálenost, na kterou můžeme přenášet signál

Odstranění chromatické disperze dosáhneme:[4]

Provozování systému v oblasti vlnových délek nulové materiálové disperze, použitím úzkopásmových zdrojů světla.



Obrázek 2.5 chromatická disperze[4]

2.2.6 Polarizační vidová disperze:

Vyskytuje se u jednovidových vláken. Jediný vid pohybující se v jednovidovém vlákně, se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Kruhové nesymetrie (např. z výroby, mikroohyby atd.) způsobí rozdílnou rychlost šíření obou polarizací.[1]

Polarizační disperze způsobuje:[1]

-rozšíření impulzu, zkreslení analogového signálu

2.2.7 Útlum světelného signálu v optickém vlákně

V závislosti na vzdálenosti od zdroje signálu klesá výkon optického signálu. Útlum optického vlákna se udává v dB. Útlum optického vlákna je definován jako poměr vstupního světelného výkonu $P_1(W)$ a výstupního světelného výkonu $P_2(W)$, pro určitou vlnovou délku $\lambda (nm)$. Útlum optického vlákna získáme ze vztahu:[1]

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dB}] \quad (2.5)$$

Měrný útlum vlákna se vztahuje k délce vlákna (1km). Získáme jej ze vztahu:[1]

$$a = \frac{1}{l} \cdot 10 \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dB/km}] \quad (2.6)$$

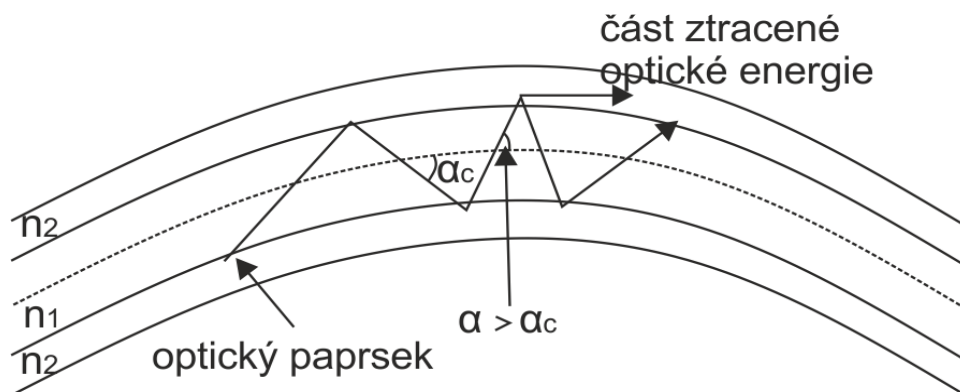
a – měrný útlum [dB/km], l – vzdálenost (km)

Útlum optického signálu ve vlákně zapříčiňují ohybové ztráty, mikroohybové ztráty, absorpce a rozptyly světelných paprsků, spojování optických vláken. [1,4]

2.2.8 Ohyby optického vlákna

Jsou důsledkem flexibility optických vláken. Pro část vedené světelné energie ve vlákně je porušena podmínka úplného odrazu na rozhraní jádra a pláště. Ohyby mění optické i mechanické vlastnosti vláken.[4]

Při ohýbání vlákna dochází ke změně úhlů dopadu a odrazu přenášených paprsků. Tzn. některý paprsek může překročit mezní úhel odrazu a nenavázat se zpět do jádra vlákna (pronikne rovnou do pláště) obr.2.6. Na výstup optického vlákna se přenesou méně světelných paprsků, než kolik bylo na vstupu. Z hlediska přenosu dat je tento jev nežádoucí. Tohoto jevu se využívá při konstrukci optických senzorů.[1]



Obrázek 2.6 Ohybové ztráty v optickém vlákne [4]

n_1 -index lomu jádra

n_2 -index lomu pláště

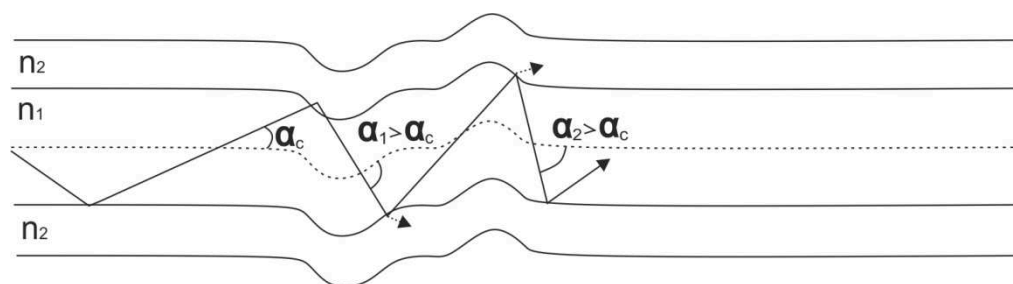
α_c - mezní úhel lomu

2.2.9 Mikroohyby vlákna

Nedokonalosti v geometrii vlákna, zapříčiňují mikroohybové ztráty. Mikroohyby mohou také vzniknout působením vnějšího jednobodového tlaku na plášť kabelu. Na mikroohybu jsou paprsky odraženy pod velkým úhlem a proto jsou rozptylovány mimo jádro vlákna, tím dochází ke zvyšování útlumu obr. 2.7. [1]

Příčiny:[4]

Fluktuace indexu lomu, mechanické napětí vlákna, teplotní namáhání, kolísání geometrických rozměrů.



Obrázek 2.7 mikroohyby působící na optické vlákno[4]

n_1 - index lomu jádra

n_2 - index lomu pláště

α_c - mezní úhel lomu, $\alpha_{1,2}$ – úhly větší než mezní úhel

2.2.10 Absorpce

Ztráta energie, z důsledku přechodů elektronů do vyšších energetických stavů. Podmínka výskytu, musí existovat materiály s vhodnými energetickými stavy. Absorpční ztráty jsou vždy spektrálně závislé. Hlavními absorbéry jsou OH ionty na vlnových délkách 945nm, 1240nm, 1380nm obr. 2.8.[4]

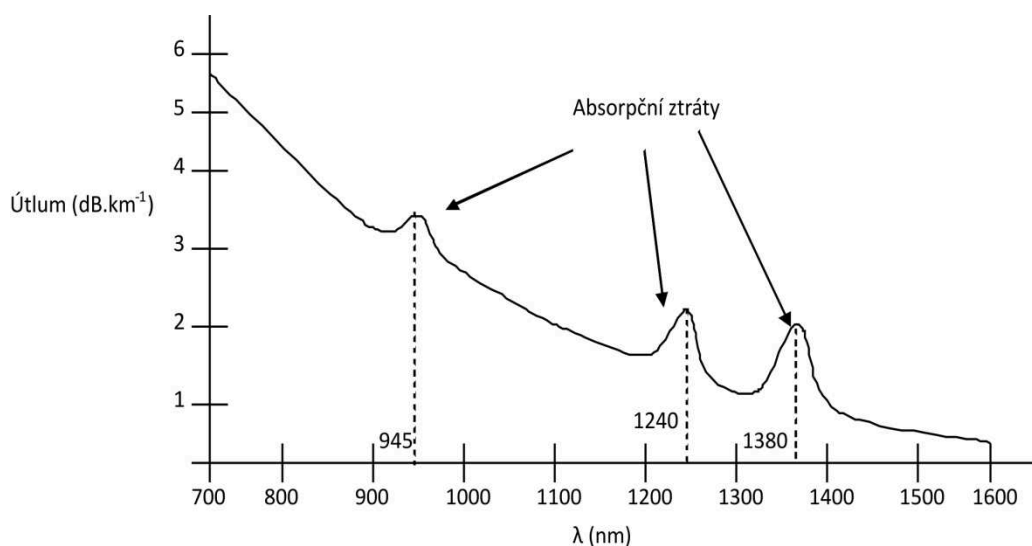
OH ionty - Je to zbytková vlhkost, která byla ponechána ve vlákně v průběhu výrobního procesu. OH ionty ovlivňují na určitých vlnových délkách útlum vlákna.[1]

Okna propustnosti (pracovní vlnové délky):[4]

850nm - útlum (3 - 4dB.km⁻¹)

1300nm - útlum (0,4 - 0,6dB.km⁻¹)

1550nm - útlum (0,25 - 0,4dB.km⁻¹)



Obrázek 2.8 absorpční ztráty [4]

2.2.11 Rozptylové ztráty

Změna směru šíření optického záření na mikropřekážkách, nečistotách, fluktuacích indexu lomu.[4]

Další druhy ztrát v optických vláknech:[1]

Odraz optického záření ve spoji 2 vláken, ztráty způsobené rozdílným průměrem spojovaných vláken, ztráty v posuvu os spojovaných vláken a úhlová odchylka spojovaných vláken

2.3 Typy optických vláken

Z hlediska přenosu dělíme optická vlákna na dva základní typy:[1]

Jednovidová vlákna, mnohovidová vlákna (se skokovou změnou indexu lomu SI, s gradientní změnou indexu lomu GI)

Hlavními odlišnostmi jsou rozměry jádra (mnohovidová vlákna se vyrábějí s větším průměrem než jednovidová vlákna). Jednovidová vlákna přenášejí jeden světelný paprsek (vid), mnohovidová více paprsků (vidů).[1]

Z hlediska materiálu jádra a pláště dělíme optická vlákna na:[4]

-jádro i plášť jsou vyrobeny z materiálu SiO_2

-jádro i plášť jsou vyrobeny z plastu

PCS – SiO_2 jádro, plastový plášť

2.3.1 Jednovidová vlákna (Single Mode Fibers SMF)

Využívají se především při přenosech dat na větší vzdálenosti. Malým průměrem jádra je schopno vlákno vést pouze jediný vid obr.2.9. Paprsek se vláknem šíří bez odrazů ve směru osy vlákna. Průměr jádra pro vlnové délky od 300nm do 1600nm je 4-10 μm . Velikost průměru jádra u jednovidových vláken je závislá na použité vlnové délce světelného paprsku, např. pro vlnovou délku 450nm je průměr jádra 5,5 μm , pro 1300nm je průměr jádra 9 μm . [1]

Podmínky a metody pro dosažení SM režimu:[4]

-zmenšení průměru jádra, zmenšení numerické apertury, menší Δ (rozdíl mezi indexem lomu pláště a jádra)

[4]Podmínka pro SM režim – normalizovaná frekvence $V \leq 2,405$

$$V = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot NA = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.7)$$

V - normalizovaná frekvence

d-průměr vlákna (μm)

λ -vlnová délka (nm)

NA-numerická apertura

n_1, n_2 – indexy lomu jádra a pláště

Nevýhody jednovidových vláken:[4]

Malý průměr jádra, malé Δ (rozdíl mezi indexem lomu pláště a jádra), citlivost na ohyby a mikroohyby, citlivost na kolísání geometrických rozměrů, obtížné spojování a vazba světla do vlákna.

Vlastnosti jednovidových vláken[1]

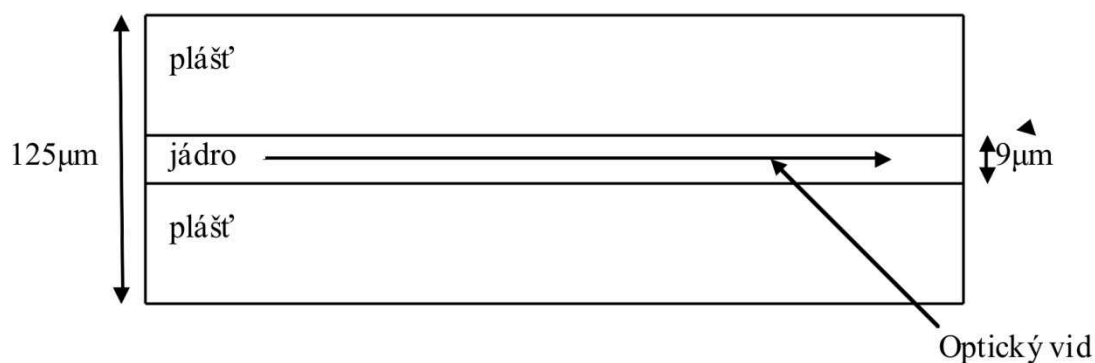
-mají velkou šířku pásma a malý útlum, dokážou přenášet velké množství informací

-zachovávají vysokou věrnost přenášeného signálu i na větší přenosové vzdálenosti, takže za stejný časový interval může být přeneseno více dat, než u mnohovidových vláken

-neprojevuje se vidová disperze, označují se malou hodnotou numerické apertury

-rozšíření světelného impulzu působením chromatické disperze je závislé na spektru vlnových délek vysílané zdrojem záření

-jako zdroje záření se nejčastěji používají laserové diody



Obrázek 2.9 jednovidové vlákno[1]

2.3.2 Mnohovidová vlákna (Multi Mode Fibers MMF)

Od jednovidových vláken se liší větším průměrem jádra a větší numerickou aperturou NA. Výhodou je snadnější manipulace při spojování vláken, připojování světelných zdrojů atd.

Rozeznáváme 2 základní typy vláken, podle způsobu šíření paprsku vláknem a podle změny optických vlastností (index lomu) na rozhraní jádra a pláště.[1]

- mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu
- mnohovidová vlákna s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu

Vlastnosti mnohovidových vláken[1]

- přenos světelných informací je omezen vidovou disperzí
- větší útlum oproti jednovidovým vláknům, malá šířka pásma
- důsledkem větší numerické apertury se snadněji navazuje optický paprsek do vlákna
- možnost využití více typů zdrojů záření (např. LED diody nebo laserové diody)
- jednodušší spojování vláken oproti jednovidovým vláknům

2.3.3 Vlákná se skokovou změnou indexu lomu

U těchto typů vláken se šíří paprsky po různých drahách a na rozhraní jádra a pláště dochází k ostrému lomu paprsků obr.2.10. Nejkratší dráhou se pohybuje přímý paprsek (nejnižší vid). Nejdelší dráhu vykoná paprsek, který má úhel odrazu na pomezí mezního úhlu (nejvyšší vid). Různé dráhy jednotlivých paprsků způsobí, že na konec vlákna dorazí v různých časových intervalech. Ve vlákne dochází vlivem rozdílného šíření k tzv. módové disperzi.[1]

Velký průměr vlákna a numerická apertura umožňují využití těchto vláken:[1]

- přenosy výkonných laserových paprsků (v medicíně, opracování materiálu atd.)

-v LAN sítích, vláknové senzory atd.

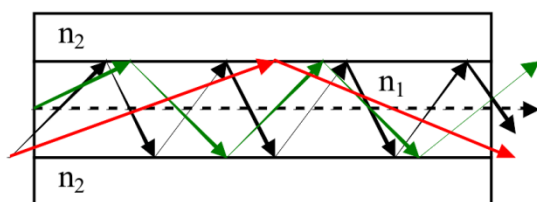
Nevýhody vláken:[1]

-vlivem vidové disperze malá šířka pásma, nelze používat pro přenosy na větší vzdálenosti.

Typické parametry mnohovidových vláken se skokovou změnou indexu lomu:

-numerická apertura $NA=0,2$ pro vlákno $50/125\text{ }\mu\text{m}$ (jádro/plášť), $NA=0,275$ pro vlákno $62,5/125\text{ }\mu\text{m}$

-průměr primární ochrany $250\text{ }\mu\text{m}$, útlum $5\text{--}10\text{ dB/km}$, šířka pásma $50\text{ MHz} \cdot \text{km}$



Obrázek 2.10 mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [1]

n_2 - index lomu pláště

n_1 - index lomu jádra

2.3.4 Vlákná s gradientní změnou indexu lomu

Mezi jádrem a pláštěm dochází k plynulé změně drah paprsků obr.2.11. Paprsek se šíří rychleji v prostředí s menším indexem lomu, proto paprsky, které se budou šířit v blízkosti pláště (plášť má nižší hodnotu indexu lomu než jádro) mají vyšší přenosovou rychlost, tudíž celková doba jejich přenosu vláknem se téměř nebude lišit od doby přenosu přímého paprsku. Oproti vláknům se skokovou změnou indexu lomu, se dosahuje zmenšení vlivu módové disperze. Tím dosáhneme zvětšení šířky pásma.[1]

Použití vláken[1]

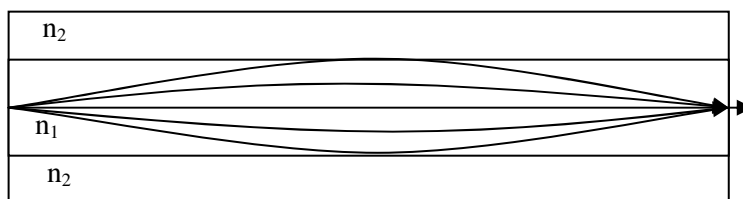
Pro datové komunikace do vzdálenosti stovek metrů, vláknově optické senzory

Parametry vláken s gradientní změnou indexu lomu:[1]

Průměry vláken s postupnou změnou indexu lomu jsou $50/125\text{ }\mu\text{m}$, $62,5/125\text{ }\mu\text{m}$, $85/125\text{ }\mu\text{m}$ a $100/140\text{ }\mu\text{m}$.

- $NA=0,2$, útlum $0,8\text{--}5\text{ dB/km}$, větší útlum na vlnové délce 850 nm , menší na 1300 nm

-Šířka pásma: $500\text{ MHz} \cdot \text{km}$ na 850 nm



Obrázek 2.11 mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [1]

n_2 - index lomu pláště

n_1 - index lomu jádra

2.3.5 Porovnání jednovidových a mnohovidových vláken

Výhody jednovidkových vláken oproti mnohovidovým:[1]

Menší útlum umožňuje přenos dat na 50x větší vzdálenosti než mnohovidovými vlákny. Z tohoto důvodu se nemusí používat na přenosové trase velké množství korekčních prvků (zesilovačů atd.). Větší šířka pásma dovoluje přenášet větší objemy dat velkou přenosovou rychlostí. Další možnou variantou je nižší přenosová rychlost na větší vzdálenosti.

Výhody mnohovidových vláken oproti jednovidovým[1]

Větší hodnota NA-snadnější navazování světelného záření do vlákna. Možnost použití různých zdrojů záření (mimo laserů a laserových diod, využití také LED diod). Snadnější spojování vláken kvůli většímu průměru vlákna.

3 Spojování optických vláken

Optické vláknové linky spolu s komunikačním systémem vyžadují přesné ukončení a spojení přenosového média. V současnosti se nejvíce využívá dvou hlavních kategorií optického spojení.[3]

Svařování optických vláken. Jsou to polotrvalé nebo trvalé spoje, které nacházejí hlavní uplatnění v optických vláknových systémech.[3]

Rozebíratelné optické konektory nebo jednoduché konektory. Jsou to rozebíratelné spoje, které umožňují jednoduše a rychle spojit a rozpojit vlákna.[3]

3.1 Svařování optických vláken

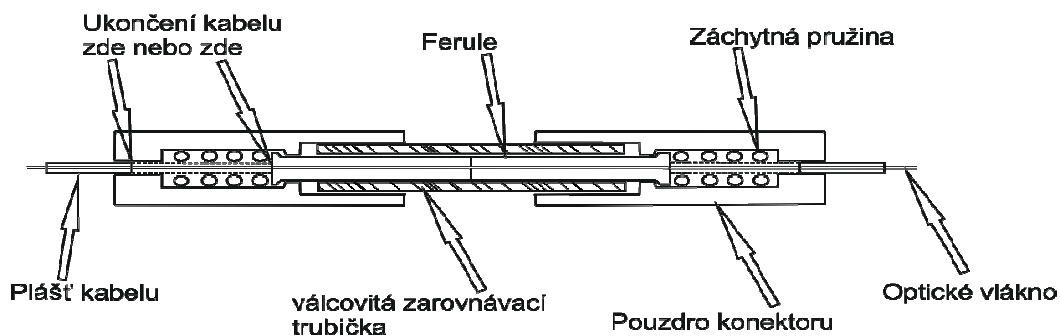
Proces svařování vláken zahrnuje: žhavení dvou konců vláken na jejich tavný bod, spolu s působením dostatečného osového tlaku mezi oběma vlákny. Je proto nezbytné, aby konce vláken byly náležitě umístěny a zarovnané, za účelem dosažení přesné návaznosti optického vlákna v bodě spojení. Proto jsou obvykle vlákna umístěna a zajištěna za pomoci kontrolního mikroskopu. [3]

Svařování vláken se využívá v komunikacích na velké vzdálenosti a ve vláknově optických přenosových systémech, které vyžadují minimální útlum vláknového spoje. Útlum v místě svaru se běžně pohybuje v řádech setin decibelu.[3]

3.2 Rozebíratelné optické konektory

Základní ferule konektoru, která je jedna z nejjednodušších optických vláknových konektorů znázorňuje *Obrázek 3.2*. Dvě vlákna určená pro připojení jsou spojena v kovových přípojkách známé jako ferule (pevná trubička, která udržuje zasunuté vlákno v konektorové soustavě), které mají přesně vyvrtané centrální dírky ve svých čelních stranách, kde se nachází optické vlákno. V konektoru jsou dvě ferule umístěny v zarovnávacím pouzdře, které používá přesně opracované součásti, umožňující spojit konce vláken. Ferule jsou udržovány na místě, prostřednictvím záchytného mechanismu pružin. [3]

Optické konektory musí zajistit souosost spojovaných vláken, spolehlivost a odolnost vůči působení vlivů z okolního prostředí (vlhkost, teplota atd.). Podle druhu použité spojky se útlum pohybuje v řádech desetin až jednotek decibelu.[3]



Obrázek 3.1 Složení základního konektoru pro spojení dvou vláken [3]

3.3 Konektory

Konektory jsou koncovými body optického systému. Umožňují připojit vlákno k obslužnému zařízení. Konektory jsou obtížnější z hlediska návrhu než mechanické spoje, z důvodů opakovaného rozebírání a spojování.[5]

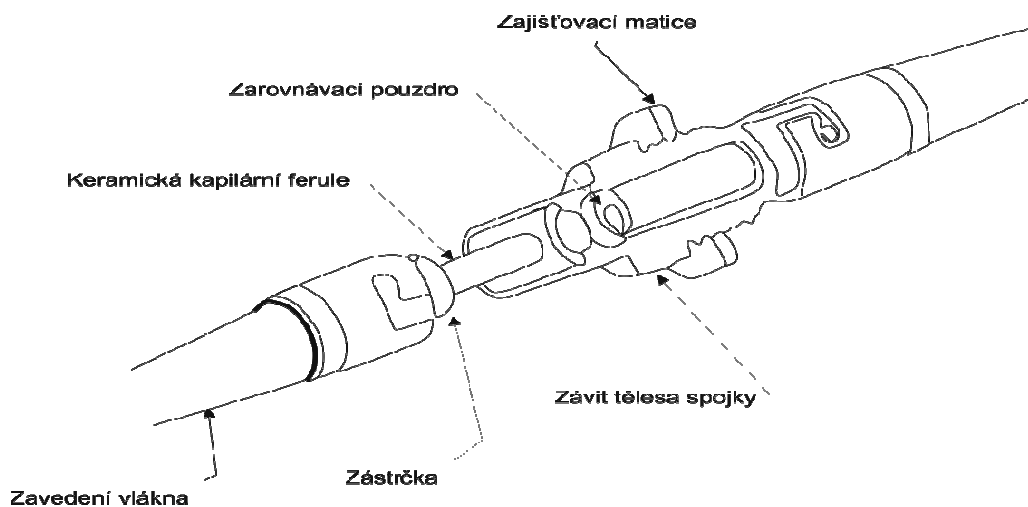
Běžné parametry konektorů [5]

Vložné ztráty – Je to nejdůležitější parametr výkonu konektoru. Představuje ztrátu způsobenou vložení konektoru na optické vlákno.

Odrazové ztráty – Je to parametr Fresnelova odrazu. Část optického záření je odraženo konektorem zpět směrem ke světelnému zdroji.

Základní přehled typů konektorů

Mnoho typů konektorů s válcovitým pouzdrem, je využíváno pro mnohovidová i jednovidová vlákna. Nejčastěji používané konstrukční typy jsou s přímým koncem ST (Straight tip), subminiaturní (SMA), vláknové konektory (FC), miniaturní jednotky (MU), účastnický konektor (SC) a D4 konektor. Na obr.3.3 Je znázorněn ST konektor pro mnohovidové vlákno.[3,5]

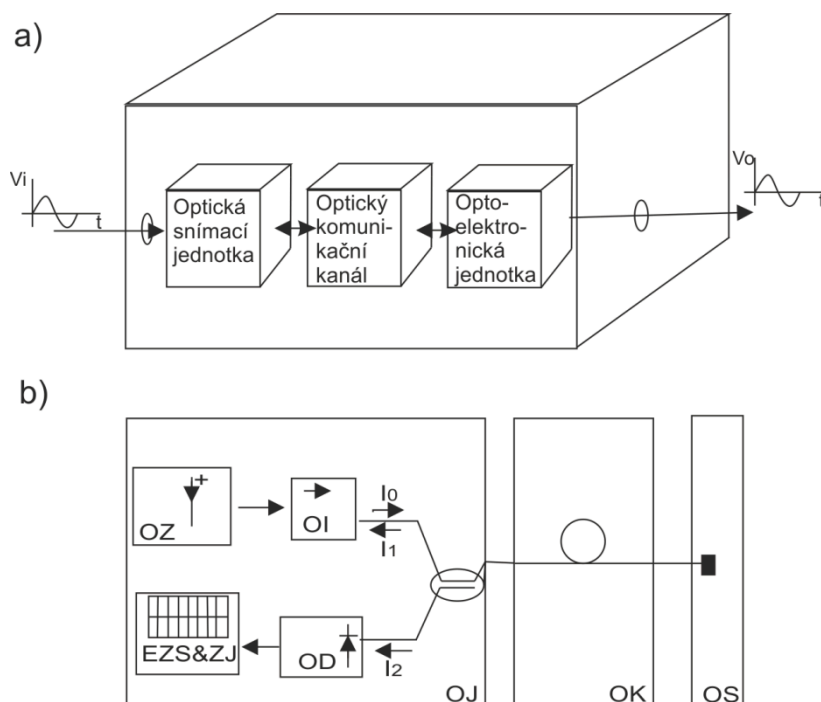


Obrázek 3.2 vláknový konektor ST využívající keramické kapilární ferule [3]

4 Vláknové optické senzory

4.1 Optický senzor

Senzorový systém je obvykle tvořen snímacím zařízením, komunikačním kanálem a subsystémem pro generování nebo detekování, zpracování signálu. Všechny části senzoru mohou být integrovány. Jestliže je využíváno světelného záření v některém ze subsystému, tak je fotonický systém chápán jako fotonický senzor a je běžně používán jako optický senzor. V optickém senzoru určuje celý sensorový systém obvykle snímací zařízení.[6]



Obrázek 4.1 a) blokový diagram optického sensorového systému [6]

b) příklad architektury Optického senzoru [6]

OJ-optoelektronická jednotka, OK-optický kanál, OS optický snímač, OI-optický izolátor, OS-optický zdroj, OD-optický detektor, EZS.ZJ-zobrazovací jednotka a elektronické zpracování signálu

Optický senzor je fotonický systém, ve kterém měřený objekt rozsahem, měřenou veličinou nebo vstupním signálem (V_i) přináší změny nebo modulace, v některé z vlastností světla v optickém systému. Poté, co byl signál detekován, zpracován a upraven, systém poskytne výstupní signál (V_o), obvykle v elektrické podobě, který bude platnou reprodukcí proměnné objektu. Přenesené nebo odražené světlo, může být modulováno měřenou veličinou nebo modulačním signálem v jeho amplitudě, fázi, frekvenci nebo polarizační charakteristice.[6]

Pokud některý z procesů nebo částí využívá opto-vláknovou technologii, pak je vytvořeno dělení optických senzorů známých jako vláknově optické senzory (Fiber Optic Sensors FOS) nebo optické vláknové senzory (Optical Fiber Sensors OFS).[6]

4.2 Rozdělení vláknově optických senzorů

4.2.1 Oblasti a druhy měřených veličin

Podle oblasti a druhu veličiny, která má být měřena, mohou být senzory klasifikovány jako:

a) mechanické – Skupina zahrnující měření vibrace, posuvu, rychlosti, zrychlení, síly a tlaku. Změny v optickém signálu jsou produkovány seismickými otřesy, paprsky, membránami. Jsou to typické příklady technik pro měření kontaktních nebo bezkontaktních veličin. [6]

b) teplotní – Teplota může být měřena kvůli závislosti spektra emise na absorpci, indexu lomu, přenosových parametrech, periodě difrakční mřížky, nelineárních efektech jako je rozptyl. [6]

c) elektromagnetické – Elektrické pole, elektrický proud a magnetické pole, mohou být převedeny a měřeny použitím elektro-optiky, magneto-optiky a Faradayova efektu, ve fotonických materiálech a zařízeních. [6]

d) radiace (záření) – Pro měření rentgenových paprsků a nukleárního záření se využívá jevu luminiscence nebo fluorescence, které tato záření způsobují ve fotonických materiálech a zařízeních.

e) chemické složení – Modifikace ve světelném záření (absorpce, fluorescence, doba rozpadu) způsobené chemickou koncentrací. [6]

f) proudění a turbulence tekutin – Patří mezi další techniky. Disperze a absorpce vyvolané částicemi v suspenzi jsou použity pro jejich měření. [6]

g) typické veličiny v oblasti biomedicíny – Jako je kyselost, kyslík, oxid uhličitý, průtok krve, nitrolební tlak, monitorování teploty, identifikace DNA atd. Všechny tyto veličiny jsou měřeny prostřednictvím technik jako jsou absorpce a fluorescence. [6]

4.2.2 Prostorové rozložení měřené veličiny

Podle prostorového rozložení měřené veličiny, VOS může být jedním z následujících čtyř typů:

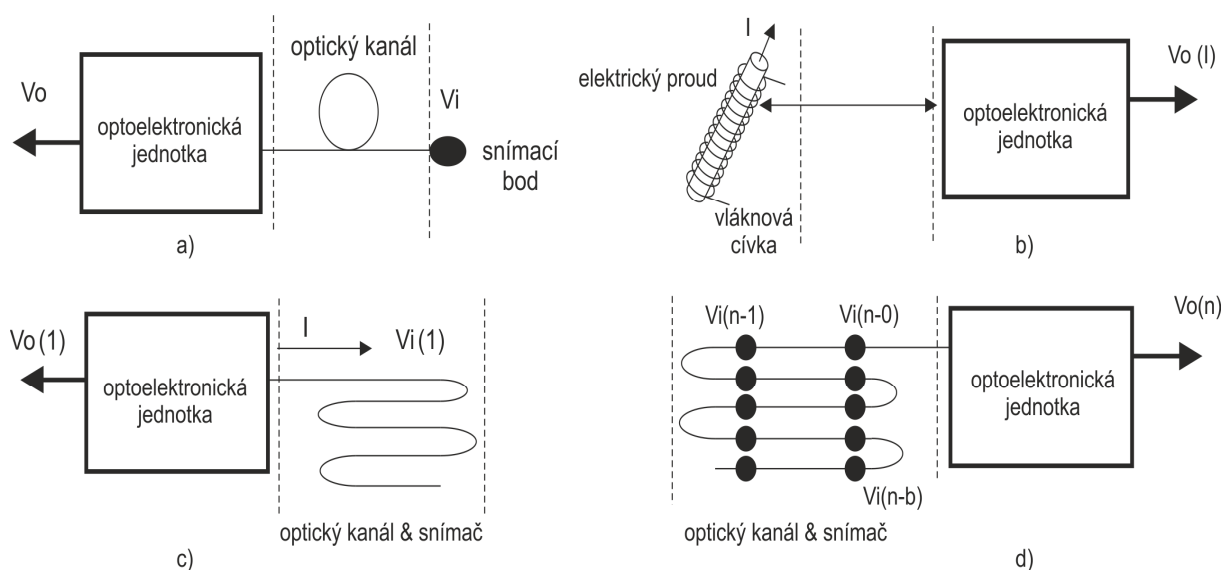
a) bod, kdy se měření provádí v diskrétních bodech přístupnými různými kanály. Jinými slovy, každý senzor detekuje pouze v jednom bodě obr.4.2 a). [6]

b) integrované, kdy je měření sjednoceno ze všech hodnot proměnné objektu - přispívající pouze k jedné výsledné hodnotě. Příkladem tohoto typu VOS je senzor, pro měření elektrického proudu využívající Faradayova efektu obr.4.2 b). [6]

c) distribuované, které mohou měřit hodnotu veličiny podél linie celé vlastní délky.

Příkladem tohoto typu je vláknový senzor pro distribuované měření teploty, který v praxi stanovuje rozložení teploty po celé délce vlákna, které funguje jako čidlo. Optické vlákno vystupuje současně jako snímač a komunikační kanál obr.4.2 c).[6]

d) kvazi-distribuované – jsou schopné měřit hodnotu proměnné v předem definovaných bodech podél délky vlastního vlákna. Využívají se speciální vlákna citlivá na specifický druh látky nebo se přidávají speciální příměsi, vložené do optické smyčky, umožňující snímání měřené veličiny. U těchto senzorů je možné výrazně zvýšit počet měřících bodů použitím optických multiplexovacích technik obr.4.2 d).[6]



Obrázek 4.2 snímání a) bodové, b) integrované, c) distribuované, d) kvazi-distribuované [8]

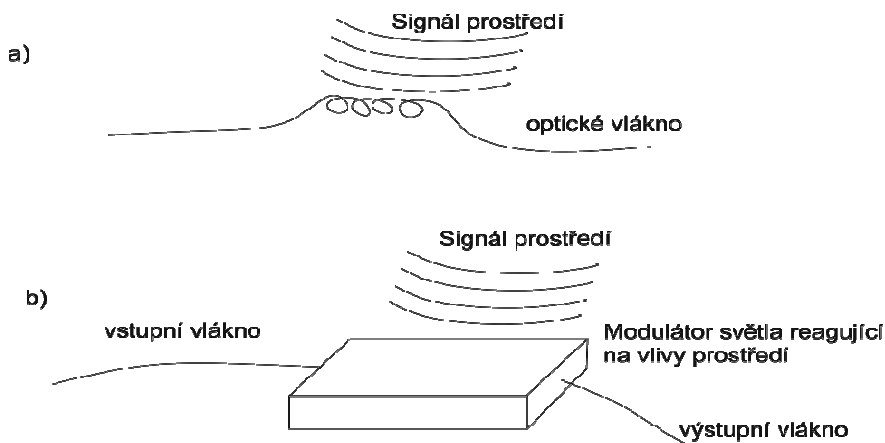
4.2.3 Povaha snímání

Optická vlákna jsou využívána ke snímání vlivů působícího prostředí dvěma odlišnými způsoby. Tyto způsoby jsou vnější a vnitřní snímání.[6]

a) vnitřní – optické senzory (snímače), ve kterých je používán optický vlnovod k uskutečnění snímání pomocí modifikace, v některém ze způsobu jeho vnitřních charakteristik přenosu nebo odrazu světla, související s měřenou veličinou. U těchto typů senzorů, světelný paprsek zůstává zcela nebo částečně ve vlnovodu. Tato třída může být dále dělena do podtříd podle typu modulace působící na světelný paprsek, jako je intenzita, fáze nebo polarizace.[6]

b) vnější – snímače, ve kterých je interakce mezi světlem a měřenou veličinou vytvářena ve vnějším optickém zařízení „černé krabice“ (které je ovlivněno měřenou veličinou). Optické zařízení může obsahovat zrcadla, plynové nebo kapalinové články, samonosné rameno nebo další mechanismy,

které mohou generovat, modulovat nebo přetvářet světelný paprsek. Modulované světlo je poté vráceno do příchozího nebo dalšího vlnovodu. U těchto snímačů jsou procesy světelné modulace prováděny mimo optický vlnovod.[6]



Obrázek 4.3

a) Vnitřní optický senzor, jehož vlastnosti propustnosti jsou modulovány dopadajícím signálem prostředí [7]

b) Vnější optický senzor skládající se ze vstupního a výstupního vlákna nesoucí světelný signál směrem dovnitř a z modulátoru, který moduluje světelný paprsek při aktivaci signálem prostředí.[7]

4.2.4 Modulace měřené veličiny

Podle typu modulace, která se využívá pro modulaci optického záření, se dělí VOS do 4 hlavních typů [6]:

Amplitudové neboli Intenzitní-modulované senzory, ve kterých měřená veličina změní optickou intenzitu (amplitudu) přenášenou vláknem. Mohou používat nekoherentní nebo koherentní světelné zdroje spolu s jednoduchými optickými součástkami. Mohou se uplatňovat v širokém spektru aplikací, včetně oblasti průmyslu.[6]

Fázové nebo interferometrické senzory, u kterých měřená proměnná způsobuje modulaci ve fázi světelného záření ve snímací jednotce. Tyto typy VOS vyžadují koherentní zdroje záření, jednovládná vlákna a složitá optická zařízení k řízení polarizace. Občas se musí použít polarizačně udržovaná vlákna, které zvyšují jejich cenu. Nicméně, potenciálně nabízí největší citlivost, které může být dosaženo. Jeden z nejlepších představených interferometrů, který využívá světelný zdroj s nízkou koherencí, byl nazván bílý světelný interferometr.[6]

Polarizační senzory, u těchto senzorů měřená proměnná moduluje polarizaci světla. Příkladem je proudový měřič založený na Faradayovém efektu.[6]

Spektroskopické senzory, jsou senzory, ve kterých proměnná objektu moduluje spektrum optického záření.[6]

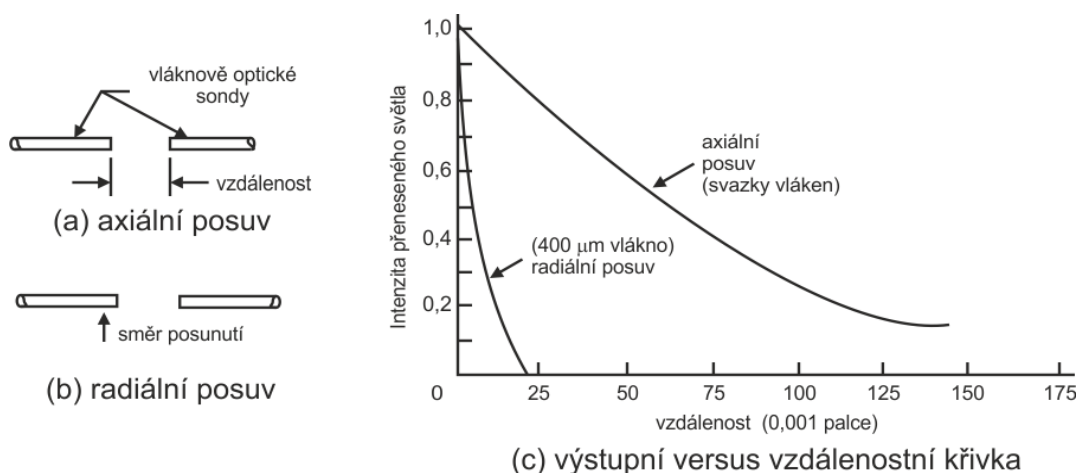
4.3 Intenzitní vláknově optické senzory

Intenzitní FOS jsou v podstatě jednoduché a vyžadují pouze prosté elektronické rozhraní. Základní postupy pro návrh a realizaci intenzitních senzorů obsahují mechanismy: přenos, odraz a mikroohyby. Existují také další mechanismy, které lze využít spolu s těmito třemi mechanismy, jsou to absorpce, rozptyl, fluorescence, polarizace a optické mřížkování.[8]

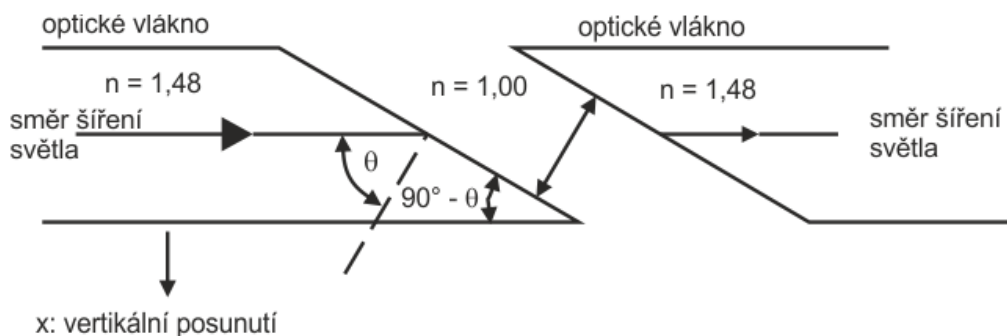
4.3.1 Přenosový intenzitní VOS

Tento typ senzoru způsobuje narušení šířícího se světelného paprsku. Obrázek 4.3 a) znázorňuje uspořádání vláknových sond pro měření podélného posunutí. Obrázek 4.3 c) znázorňuje závislost výstupní intenzity na vzdálenosti mezi sondami. Křivka odpovídá funkci $1/r^2$, kde r je vzdálenost. Citlivější přenosový princip využívá VOS pro měření radiálního posuvu. Obrázek 4.3 b). Senzor má nulový přenos za předpokladu, že jsou sondy navzájem posunuty o vzdálenost průměru sondy.[8]

Nejcitlivější přenosový VOS využívá principu totálního vnitřního odrazu obrázek 4.4. Sondy, umístěné vůči sobě, mají zbrošené čelo vlákna v určitém úhlu vzhledem k jejich ose. Vzdálenost mezi oběma konci vláken, určuje kolik světelné energie se naváže do přijímacího vlákna. [8]



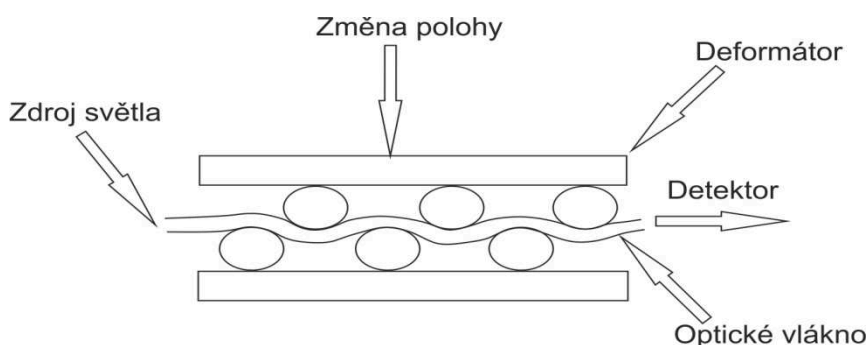
Obrázek 4.4 přenosový intenzitní VOS[8]



Obrázek 4.5 intenzitní senzor založený na principu totálního odrazu[8]

4.3.2 VOS založené na ohybu optického vlákna

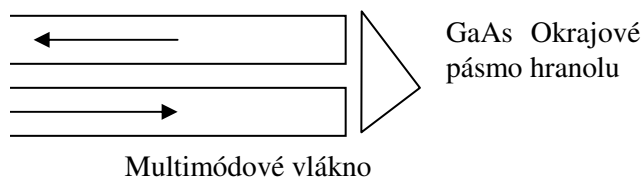
Jedním z dalších intenzitních modulačních technik je ohyb vlákna, který působí světelné ztráty ve vláknu. Tyto ohybové senzory jsou používány v aplikacích, kde může být snímán parametr (napětí, tlak, síla, pozice, zrychlení) mechanicky spojen s posuvem zařízení, které deformuje vlákno. Obr.4.6 ilustruje ohybový senzor. Jak deformační síla působí na vlákno, zvyšují se světelné ztráty (útlum) a klesá intenzita přenášeného světla.[8]



Obrázek 4.6 ohybový senzor[6,8]

4.3.3 Teplotní senzory

Teplotní závislost absorpce může být využita ke snímání teploty. Příkladem může být obrázek 4.6. Světlo z jednoho vlákna prochází skrze GaAs hranol do dalšího vlákna. Pro energii fotonu, která je menší než je energie zakázaného pásu (větší vlnové délky než 867nm), není světlo tak výrazně utlumeno v GaAs. Vlnové délky kratší než 867nm jsou absorbovány.[8]



Obrázek 4.7 Teplotní senzor

5 Optické zdroje

Slouží ke generování světla, využitého k činnosti vláknově optických senzorů. Obecně, když je světelný zdroj aktivován, tak energie, která může být ve formě tepla, chemické reakce nebo elektrického proudu, se používá k vytvoření vybuzených stavů v materiálu, ze kterého je emitováno světlo.[7]

Tabulka 5.1 znázorňuje typické pracovní vlnové délky polovodičových materiálů, nejčastěji využívané pro světelné zdroje podporující vláknově optické senzory. Pro VOS, vyžadující světelné zdroje s krátkou vlnovou délkou, pracující v oblasti blízkého viditelného spektra, jsou vyvíjeny materiály InGaP/InGaAlP. Tyto materiály vykazují vyšší spolehlivost než je 10 000 hodin (čas mezi poruchou při pokojové teplotě, kdy se pracovní vlnové délky pohybují v oblasti 680 nm). Pro ještě kratší vlnové délky se objevili komerční produkty, využívající diodou čerpané a dvojité polovodičové lasery pracující v pásmu okolo 500 nm. Tyto zdroje s krátkou vlnovou délkou jsou zajímavé pro vývojáře z hlediska fluorescence, která je důležitá při sledování chemických vlastností materiálu.[7]

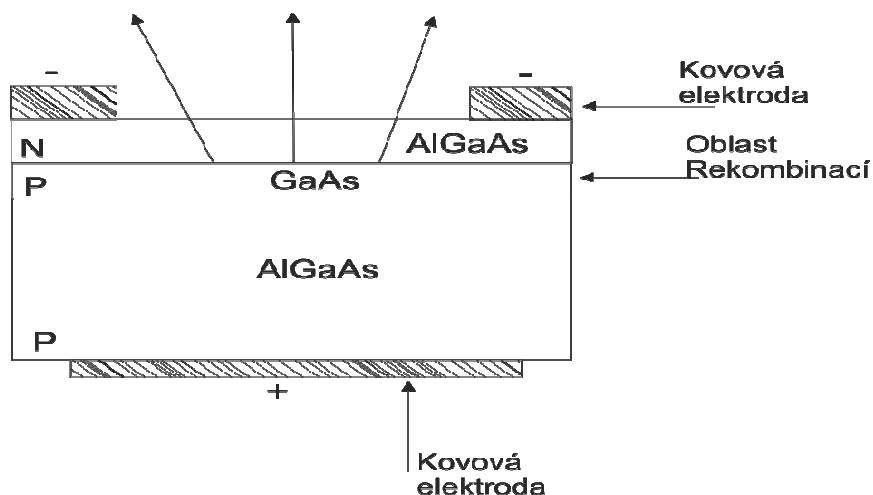
Mezi jednu z nejvýraznějších skupin polovodičových světelných zdrojů, patří zdroje založené na materiálu GaAlAs / GaAs, pracující v rozsahu vlnových délek 700-900 nm. Tyto diody byly prvními PSZ, které se značně vyvíjely v komerčním průmyslu. Jsou široce využívány pro vysoce výkonné aplikace, pro své nízké náklady a vysokou spolehlivost pro krátké datové spoje využívající mnohovidová vlákna.[7]

Oblasti pracovních vlnových délek (nm)	Materiál	Spolehlivost (h)
$\leq 0,5$	Diodou čerpané, frekvenčně zdvojené	≥ 10000
0,6-0,7	InGaP / InGaAlP	≥ 10000
0,7-0,9	GaAlAs / GaAs	10000-30000
0,9-1,7	InGaAsP / InP	> 100000

Tabulka 5.1 Polovodičové světelné zdroje pro vláknové senzory[7]

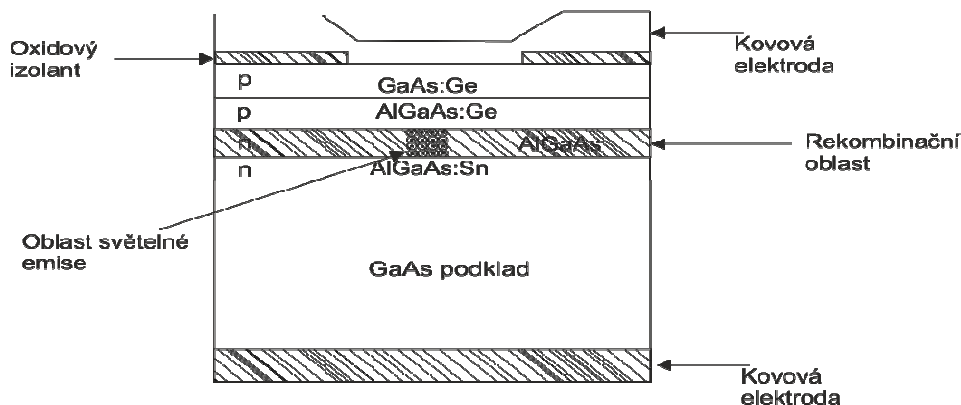
5.1 LED diody

Existují dva základní typy LED diod, které jsou běžně používané pro VOS: dioda s povrchovým vyzařováním a hranově vyzařující dioda. Dioda s povrchovým vyzařováním vyzařuje v podstatě izotropním způsobem, kdy je světlo zachyceno koncem vlákna v těsné blízkosti vyzařujícího povrchu. Obrázek 5.1 znázorňuje tento typ diody. Typicky jsou tyto diody využívány spolu s mnohovidovými vlákny.[7]



Obrázek 5.1 Dioda s povrchovým vyzařováním[7]

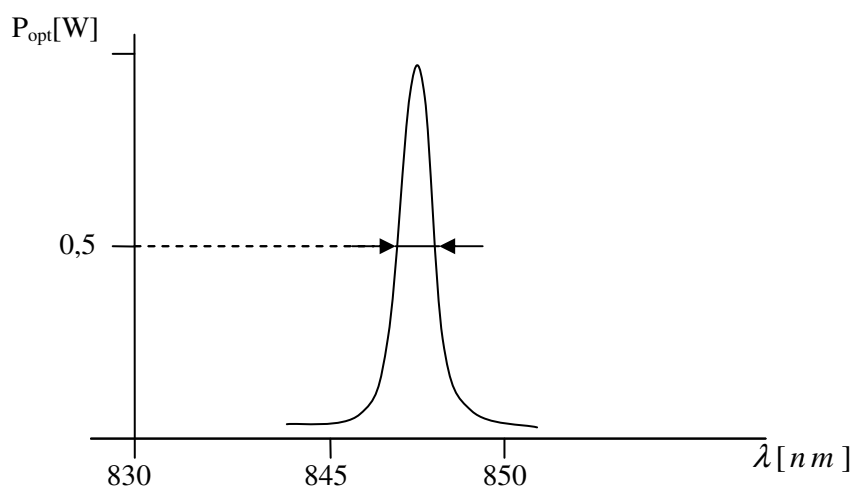
Druhý typ diody (hranově vyzařující dioda) omezuje světlo pouze do vlnovodné oblasti, prostřednictvím strukturování diody s rekombinační oblasti, vklíněnou mezi vrstvy materiálu s vyšším odstupem pásma a nižšími indexy lomu. Tento princip vede k definici tzv. dvojité heterostruktury, kdy jsou elektrody vloženy do omezeného proudového toku, pouze v části rekombinační oblasti. Světelné záření je omezeno na malou oblast. Obrázek 5.2 ilustruje hranově vyzařující diodu.[7]



Obrázek 5.2 hranově vyzařující dioda[7]

5.2 Lasery

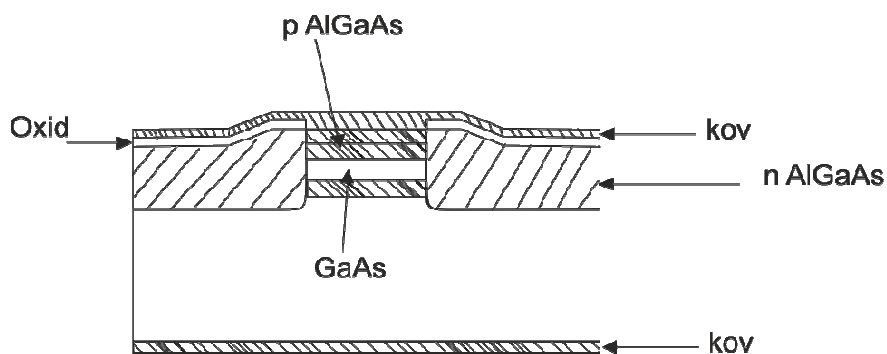
Laserové diody neboli lasery jsou světelné zesilovače pracující se stimulovanou emisí. Fungují na principu emitování jednobarevného (monochromatického) optického záření. Laserové záření je dále také koherentní (uspořádané) s malou rozbíhavostí (divergencí). Další důležitou vlastností laserů je velmi vysoká směrovost. Důsledkem je snadná fokusace i na velkých vzdálenostech. Oproti LED se dosahuje u laseru výrazně užší spektrální čáry, typická hodnota je 1-2 nm, pro nejlepší lasery až 0,01 nm.[1,4]



u[4]

Koherence znamená, že u optického záření je zachována fáze a směr nemění se s časem. Jinak řečeno, částice fotony se šíří jedním směrem a jsou v průřezu rovnoměrně uspořádané (jsou zachovány fázové vztahy mezi jednotlivými vlnami světla). Důsledkem je skládání optických vln tzv. interference světla.[1,4]

Obrázek 5.4 Znáznorňuje složení skryté heterostrukтуры laserové diody. V tomto případě je aktivní oblast obklopena materiálem s nižším indexem lomu, který se chová jako vlnovod.[7]



Obrázek 5.4 Schématické znázornění laserové diody se skrytou heterostrukturou s rekombinací v oblasti GaAs, kompletně obklopenou materiálem AlGaAs s nižším indexem lomu [7]

6 Fotodetektory

Fotodetektor je podstatný prvek optických systémů, určuje celkovou výkonnost a účinnost systému. Hlavním účelem fotodetektoru je přeměna optického signálu na elektrický.[4]

Základními požadavky na fotodetektory jsou [4]:

- velká citlivost v oblasti pracovních vlnových délek (850nm, 1300nm, 1500 nm)
- vysoký stupeň věrnosti při konverzi z optického signálu na elektrický
- velká elektrická odezva na přijatý optický signál
- krátká doba odezvy pro získání dostatečné šířky pásma
- minimální šum generovaný detektorem, stabilita převodních charakteristik, velká spolehlivost a životnost

6.1 Vlastnosti fotodetektoru

Pro detekční principy pro viditelnou a blízkou IR oblast se využívá vnitřního a vnějšího fotoefektu. Jedná se o oblasti vlnových délek 400-700nm (viditelná oblast), 800-1300nm (infračervená oblast), 1550nm. V dnešní době se výhradně využívá vnitřního fotoefektu a polovodičových součástek.[4]

Vnější fotoefekt- fotonásobiče a vakuové fotonky užívaly se v minulosti. Splňují pouze část kritérií. Jsou příliš objemné a pracují s vysokým napětím.[4]

Vnitřní fotoefekt- Na tomto principu pracují mnohé moderní polovodičové součástky. Nejvýznamnějším vnitřním fotoefektem je fotovodivost. Fotovodivostní detektory jsou založeny na světle indukovaném vzrůstu elektrické vodivosti, která se vyskytuje téměř u všech polovodičových materiálů.[4,9]

6.2 Materiály a druhy fotodetektorů

Materiály:[4]

Pro viditelnou oblast a vlnovou délku 800nm – Si, Ge, GaAs, InGaAs

Pro vlnovou délku 1300-1550nm - Ge, GaAs, InGaAs, InGaAsP

Druhy používaných fotodetektorů:[4]

Dioda PN, dioda PIN, lavinová dioda APD, fototranzistory

Materiál	Si	Ge	GaP	InGaAs
Rozsah vlnových délek (nm)	400-1070	800-1750	190-550	950-1650
Doba odezvy	1ns	5 μ s	30 μ s	5ns
Temný proud	2nA	3 μ A	100pA	30nA
Pracovní teplota	-40 až 100°C	-30 až 60°C	-40 až 85°C	-40 až 85°C
Použití pro VOS	Optické měřiče výkonu, optické komunikace, test vláken, laserová kontrola, plastové VOS	Optické měřiče výkonu, test vláken, optické komunikace, laserová kontrola, teplotní senzory	Lékařské analytické nástroje, optické měřiče výkonu, měření optické hustoty, optické detektory kouře	Mnohokanálová spektroskopie blízkého IR spektra, radiační termometrie, nedestruktivní kontroly systému, měření propustnosti optických vláken

Tabulka 6.1 Charakteristiky materiálů používaných u fotodetektorů[6]

6.2.1 Fotodioda PIN

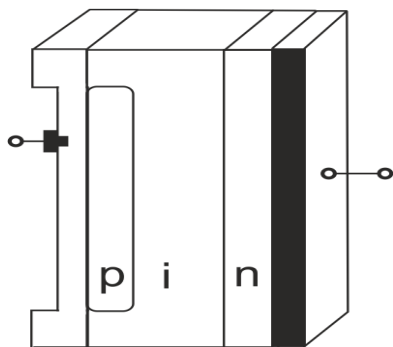
Má jako detektor řadu výhod oproti fotodiodě PN. Dioda PIN je tvořena P-N přechodem, který má vrstvu s vlastní vodivostí, uzavřenou mezi P-N přechodem obrázek 6.1. Řeší oproti fotodiodě PN problém rozšíření vyprázdňené oblasti (ochuzené vrstvy). Takováto struktura PIN rozšiřuje ochuzenou oblast a tím přispívá k rozšíření elektrického pole.[4,9]

Výhody fotodiod PIN[4,9]:

Zvětšením ochuzené vrstvy (ve které se generované nosiče pohybují driftem), se zvětší plocha k zachytávání světla.

Rozšíření ochuzené vrstvy redukuje kapacitu přechodu. Oblast generace nosičů je soustředěna na oblast I.

Široká absorpční oblast. Tloušťka ochuzené vrstvy je určena velikostí absorpce v materiálu Si.



Obrázek 6.1 fotodioda PIN [9]

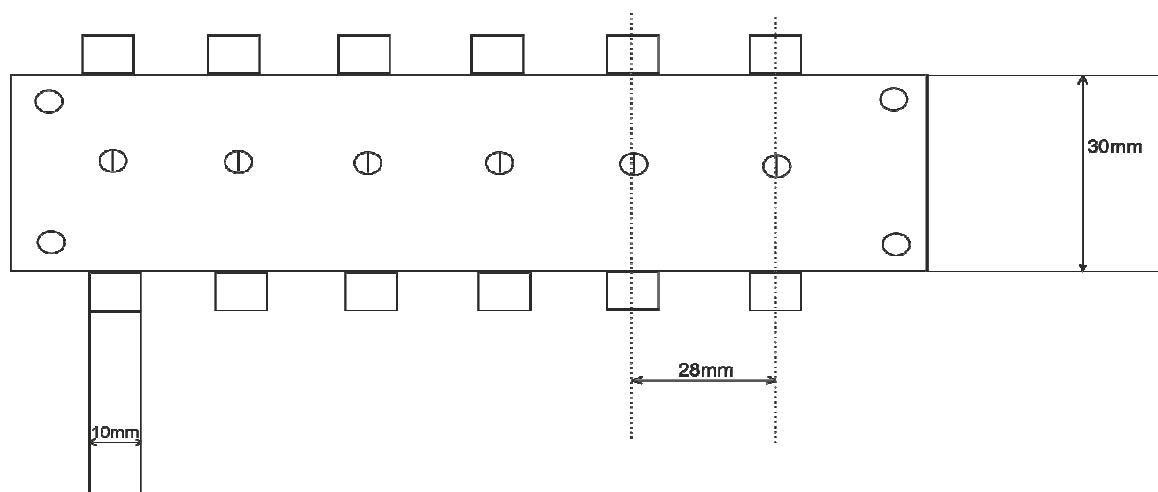
6.2.2 Lavinová fotodioda APD (avalanche photodiode)

Přeměňuje každý detekovaný foton na kaskádu pohybujících se párů nosičů. I slabě detekovatelný světelný signál vytvoří dostatečně velký proud, který lze snadno zachytit elektronickým systémem za diodou APD. Lavinová dioda se skládá z fotodiody, na kterou je přiloženo vysoké závěrné napětí. Tím v přechodu vzniká silné elektrické pole. Nosiče náboje jsou urychlovány a získávají energii, postačující k excitaci nových nosičů nárazovou ionizací. U APD se dosahuje kvantové účinnosti vyšší než 1.[9]

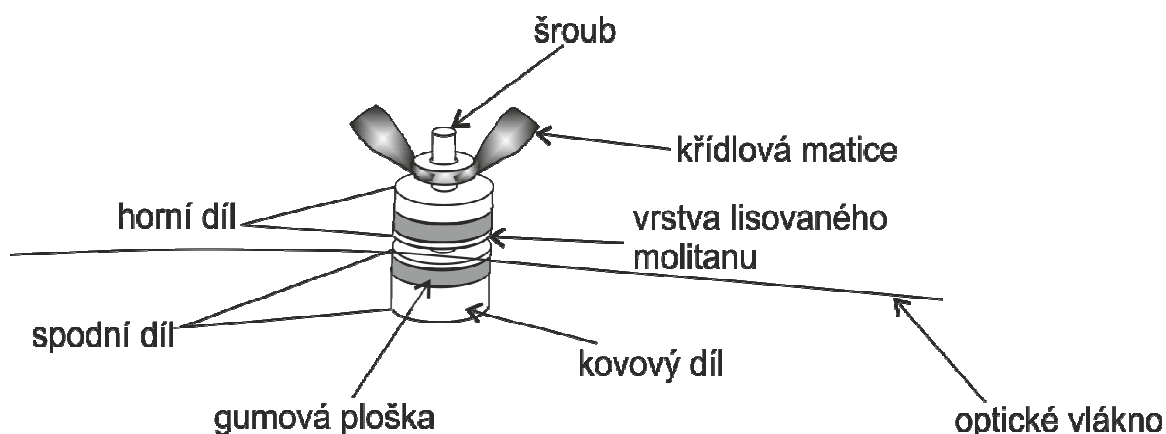
7 Realizace intenzitního makroohybového VOS

Bylo ověřeno praktické zapojení makroohybového senzoru pro snímání síly, kdy síla působící na deformátor s makroohyby, vyvolá ztrátu v intenzitě přenášeného světelného záření. Útlum je získán ohýbáním konvenčního telekomunikačního MM optického vlákna. Vláknem je zakřiveno a stlačeno mezi destičky s makroohyby, deformační silou F obrázek 7.4. Ke snímání síly, je využíváno mnohovidového optického vlákna s gradientním indexem lomu. Jakmile deformátor způsobí ohyb vlákna, v závislosti na měnící se velikosti snímání síly, pak velikost přijatého optického výkonu odpovídá velikosti snímání síly. Čím větší síla působí na deformátor, tím menší bude detekovatelný optický výkon na výstupu.[8]

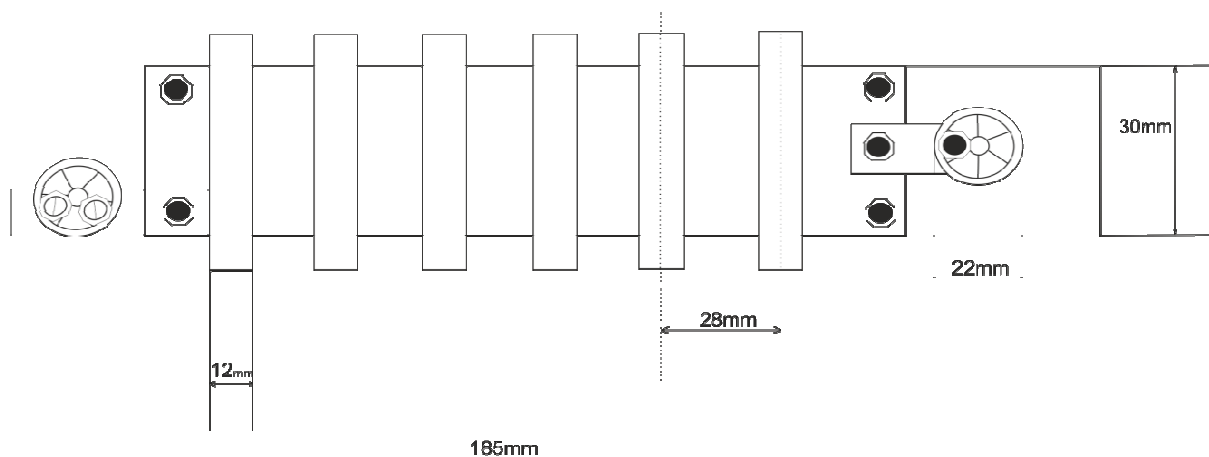
7.1 Schéma zapojení, použité přístroje:



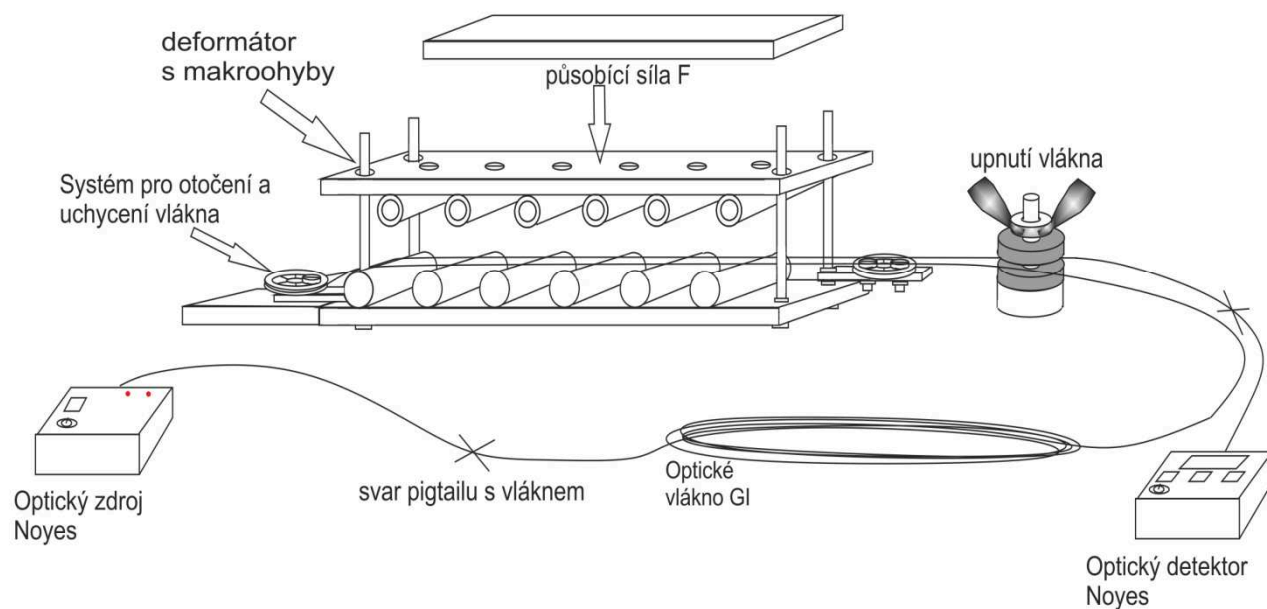
Obrázek 7.1 schéma horní části (deformátoru)



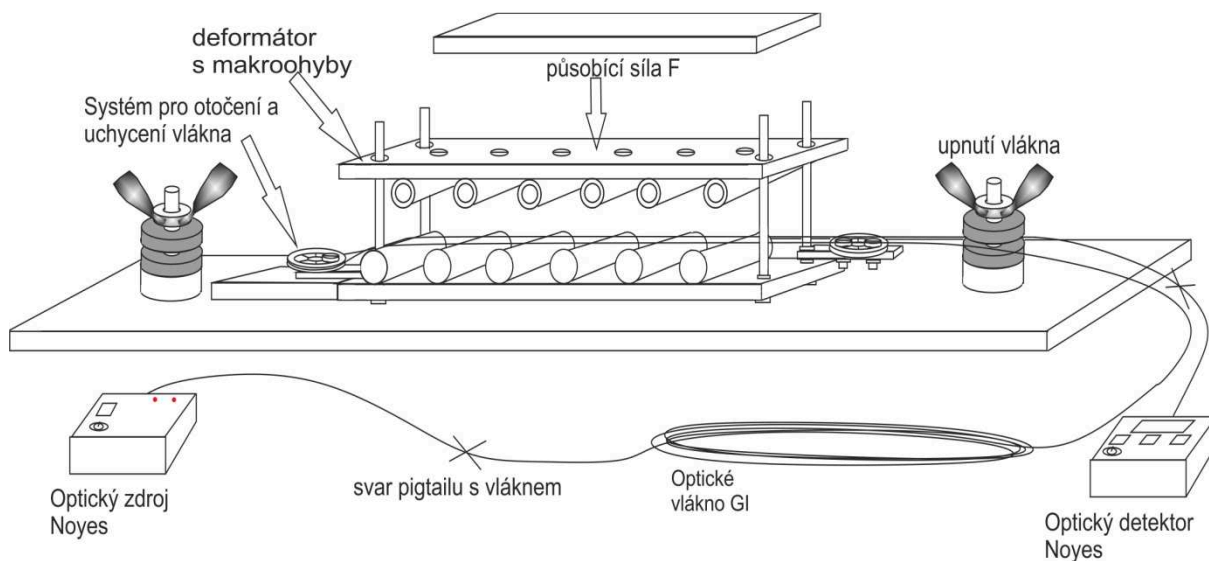
Obrázek 7.2 upínací systém



Obrázek 7.3 schéma dolní části s makroohyby



Obrázek 7.4 schéma zapojení makroohybového senzoru do optické trasy



Obrázek 7.5 schéma zapojení makroohybového senzoru pro snímání maximální zátěže

Použité přístroje a příslušenství:

Vláknová část

Optický zdroj a detektor Noyes, 2x pigtail s SC konektorem, optické GI vlákno s průměrem jádra 50 μ m, svářečka optických vláken Fujikura, nástroje pro očištění a zalomení vlákna.

Senzorová část

Upínací systém, 2x hliníkové desky s tloušťkou 3mm, 6x měděné duté trubičky o délce 40mm s průměrem 10mm, 6x ocelové plné trubičky o délce 40mm s průměrem 12mm, samořezné vruty, šrouby, matice, 4x šrouby o délce 52mm, 2x plastové kolečko s průměrem 22mm.

7.2 Popis jednotlivých částí makroohybového senzoru:

Horní část (deformátor s makroohyby)

Horní část senzoru tvoří hliníková deska s přišroubovanými měděnými dutými trubičkami, která slouží k deformaci optického vlákna (celková váha horního dílu činila 93g). Kombinace mědi a hliníku byla zvolena, z důvodu odlehčení celé horní části, aby se maximálně zabránilo působení vlastní váhy na optické vlákno a tím se zvýšil celkový rozsah měřených sil senzoru. Ve všech rozích desky byly vyvrtány 4 díry, sloužící k nasazení na dlouhé šrouby, které zajišťují stabilitu systému a zabraňují vychýlení při pokládání zátěže na deformátor. Jedná se tedy o aktivní část celého senzoru, která byla postupně zatěžována určitou silou, působící rovnoměrně po celé horní ploše viz. obrázek 7.1 a 7.4.

Upínací systém

Využívá se pro napnutí a ukotvení optického vlákna, před senzorovou částí viz. obrázek 7.2. Systém se skládá ze spodního a horního kovového dílu, kde jsou na vnitřních stranách přilepeny gumové plošky. Ve spodním dílu je zabudován šroub pro nasazení horní části. Po vložení vlákna mezi oba díly,

se upnutí provede pomocí křídlové matice. Dále byly vloženy mezi gumové plošky, dvě tenké vrstvy z lisovaného molitanu. Hlavním účelem gumových plošek a vrstvy molitanu, je ochrana před mechanickým poškozením vlákna a omezení vlivu působící síly na vlákno při upínání. Další výhodou těchto vrstev je, že omezují vznik parazitního útlumu, který vyvolá síla vlivem utažení horní části křídlovou maticí. Hodnota parazitního útlumu se při měření pohybovala v rozmezí 0,01-0,03 dB.

Spodní část

Jedná se o pasivní část zajišťující: stabilitu celého senzoru, správné uchycení a vedení optického vlákna přes makroohyby viz *obrázek 7.3*. Systém se skládá z hliníkové destičky, na kterou je přišroubováno šest makroohybů zajišťující ohýbání vlákna po přiložení horní části. Ve všech rozích destičky jsou pomocí matic přichyceny čtyři dlouhé šrouby, za účelem fixace horní části při nasazování. Dále je celý díl rozšířen o dva kruhové prvky, umožňující mnohočetné tažení, přesné uchycení a vedení vlákna v oblasti makroohybů. Nevýhodou kruhových prvků je, že způsobují při otočení vlákna kolem svých obvodů vznik parazitního útlumu. Hodnoty útlumu při jednom otočení odpovídaly 0,62-0,65 dB pro $\lambda=850\text{nm}$ a 0,71-0,74 dB pro $\lambda=1300\text{nm}$. Naopak výhodou kruhových prvků je pevné uchycení a přesnost vedení vláken, díky vyryté drážce kolem obvodu obou prvků.

7.3 Postup měření

Nejprve je nutné provést samotné propojení optické trasy tzn. (svařit pigtaily a konce optického vlákna celé trasy). Před samotným svarem je velmi důležité správně zalomit a očistit konce vláken, z důvodu omezení velikosti vložného útlumu v místě svaru. Připravené konce vláken se vloží do optické svářečky, kde se po správném nastavení menu provede svar. Stejným způsobem je svařen i další konec. Po sestavení trasy se připojí na jeden konec světelný zdroj a na druhý světelný detektor. Aktivací zdroje se začnou vysílat do vlákna světelné signály s vlnovou délkou $\lambda_1=850\text{nm}$ a $\lambda_2=1300\text{nm}$. Nyní se zapnutím detektoru určí útlum trasy pro λ_1 a λ_2 (pro λ_1 , $b=0,02\text{dB}$ a pro λ_2 , $b=0,03\text{dB}$). Po zjištění útlumů, se nastaví na detektoru referenční hodnota, podržením tlačítka REF.

Před zapojením makroohybového senzoru, je část úseku optické trasy upnuta pomocí upínacího systému viz. *obrázek 7.4*. Spodní část senzoru je umístěna těsně za upínací systém pod optické vlákno. Za pomocí kruhového prvku se otočí vlákno kolem jeho obvodu a vede se zpět směrem k upnutí *obrázek 7.4*. Nyní může být vlákno buď: otočeno kolem druhého prvku a taženo potřetí přes makroohyby nebo vyvedeno ze senzoru a zajištěno v upínacím systému. Vlákno bylo taženo 2x a 3x, z důvodu zjištění vlivu počtů ohybů a tažení vlákna, na celkový útlum optického výkonu.

Na ukotvené optické vlákno ve spodním dílu senzoru, je nasazena na dlouhé šrouby horní část. V tomto stavu jsou postupně pokládány zátěže na horní část, které vyvolávají určitý útlum

optického signálu. Hodnoty útlumů jsou posléze vyčteny z displeje detektoru a zapisovány do tabulky, ze které je sestaven graf funkce. Měření se skládá z 15-17-ti hodnot síly, kdy se postupně zvyšovala zátěž na horní část senzoru. Měření se opakovalo pětkrát. Velikost působící síly byla získána ze vzorce:

$$F = m \cdot g = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ N} \quad (7.1)$$

F je síla v N

m – je hmotnost závaží v kg

g – je gravitační zrychlení v $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

7.4 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, grafy

Tabulky a grafy při dvojném tažení optického vlákna přes sensorovou část (celkem 24 ohybů) a vlnovou délkou $\lambda_1=850\text{nm}$:

Síla F(N)	Průměrná hodnota útlumu (dB)	Hodnoty útlumů podle lineární regrese (dB)
0	0,968	1,066966921
0,41	1,144	1,181612557
0,66	1,222	1,251518433
0,96	1,326	1,335405483
1,1	1,388	1,374552774
1,35	1,46	1,444458649
1,49	1,53	1,48360594
1,74	1,608	1,553511815
2	1,72	1,626213926
2,3	1,77	1,710100976
2,55	1,814	1,780006852
2,8	1,876	1,849912728
3,1	1,934	1,933799778
3,3	1,976	1,989724479
3,55	2,03	2,059630354
3,85	2,084	2,143517405
4	2,12	2,18546093

Tabulka 7.1 Naměřené a vypočtené hodnoty útlumů

Hodnoty útlumů při $\lambda_1 = 850\text{nm}$

Příklad výpočtu jednoho bodu křivky průměrné hodnoty útlumu podle vzorce aritmetického průměru. Souřadnice bodu [2 ; 1,72], kde 2 je hodnota síly F (N) působící na vlákno a 1,72 je hodnota útlumu (dB) vyvolaná touto silou.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} = \frac{1,77 + 1,74 + 1,7 + 1,65 + 1,74}{5} = 1,72 \text{ dB} \quad (7.2)$$

x - průměrná hodnota (dB)

$x_1 - x_5$ – hodnoty útlumů v měřeních 1 až 5 (dB)

$n = 5$ – počet provedených měření senzoru

Výpočet lineární přímky byl realizován podle lineární regrese (funkce LINTREND v MS Excel), která vychází z charakteristiky průměrného útlumu. Lineární přímka vyjadřuje ideální charakteristiku měřeného makroohybového senzoru, která je důležitá pro následné určení tolerance chyb a chybového pásma.

[6] Odchyly, tolerance chyb

Maximální a minimální odchyly křivek jsou zobrazeny v grafu 7.1 jako rovnoběžné tečkované přímky, vzhledem k ideální charakteristice, prostřednictvím bodů, které se nejvíce odchylojí od ideální přímky.

Odchyly jsou definovány jako:

Maximální vyšší odchylka

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_m je maximální vyšší odchylka (dB), b_{\max} – nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky (dB) a b_{id} – ideální hodnota útlumu (dB).

$$O_m = |b_{\max} - b_{id}| = |1,77 - 1,626213926| \doteq 0,1438 \text{ dB} \quad (7.3)$$

Maximální nižší odchylka

Rozdíl nejnižší a ideální hodnoty útlumu, kde O_n je maximální nižší odchylka (dB), b_{\min} – nejnižší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky (dB) a b_{id} – ideální hodnota útlumu (dB).

$$O_n = |b_{\min} - b_{id}| = |0,96 - 1,0669666921| \doteq 0,1069 \text{ dB} \quad (7.4)$$

Po zjištění odchylek určíme toleranci chyb T jako součet maximální vyšší odchylky a maximální nižší odchylky.

$$T = O_m + O_n = 0,1438 + 0,1069 = 0,2507 \text{ dB} \quad (7.5)$$

Absolutní a relativní chyba senzoru $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$:

$$\Delta = \Delta x_m - \Delta x_{id} = 1,152 - 1,1185 = 0,0335 \text{ dB} \quad (7.6)$$

Δ – absolutní chyba senzoru (dB)

Δx_m – rozsah průměrných hodnot útlumu (dB)

Δx_{id} – rozsah ideálních hodnot útlumu (dB)

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta x_{id}} \cdot 100 = \frac{0,0335}{1,158} \cdot 100 \doteq 2,99\% \quad (7.7)$$

δ – relativní chyba senzoru v %

Δ – absolutní chyba senzoru (dB)

Δx_{id} – rozsah ideálních hodnot útlumu (dB)

Citlivost senzoru k_I

$$k_I = \frac{\Delta b}{\Delta F} = \frac{1,152}{4} = 0,288 \text{ dB} \cdot \text{N}^{-1} \quad (7.8)$$

Δb – velikost změny útlumu (dB)

ΔF – velikost změny působící síly (N)

Výpočet standardní nejistoty měření typu A

Tato nejistota je způsobená mnoha malými náhodnými vlivy. Při menším počtu měření násobíme chybu koeficientem k , se zmenšujícím se počtem měření n , totiž klesá věrohodnost nejistoty, což tento koeficient kompenzuje. Konkrétně byl tedy použit $k=1,4$, z důvodu 5-ti opakovaných měření senzoru.[10]

Počet n	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Koef. k	1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Tabulka 7.2 rozšiřující koeficient k při daném počtu měření[10]

Příklad výpočtu:

$$u_A = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \Sigma (\Delta x_m)^2} = \quad (7.9)$$

$$= 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} \left[(0,96 - 0,968)^2 + (0,96 - 0,968)^2 + \dots + (0,99 - 0,968)^2 \right]} \doteq 0,0082$$

$$x_{n1} = x_{i1} \pm u_A = 0,968 \pm 0,0082 \text{ dB} \quad (7.10)$$

u_A – standardní nejistota typu A [dB], [10]

k – koeficient rozšíření

n – počet měření

Δx_m - rozdíl naměřené hodnoty útlumu v 1. až 5. měření a průměrné hodnoty útlumu z těchto 5-ti měření (dB)

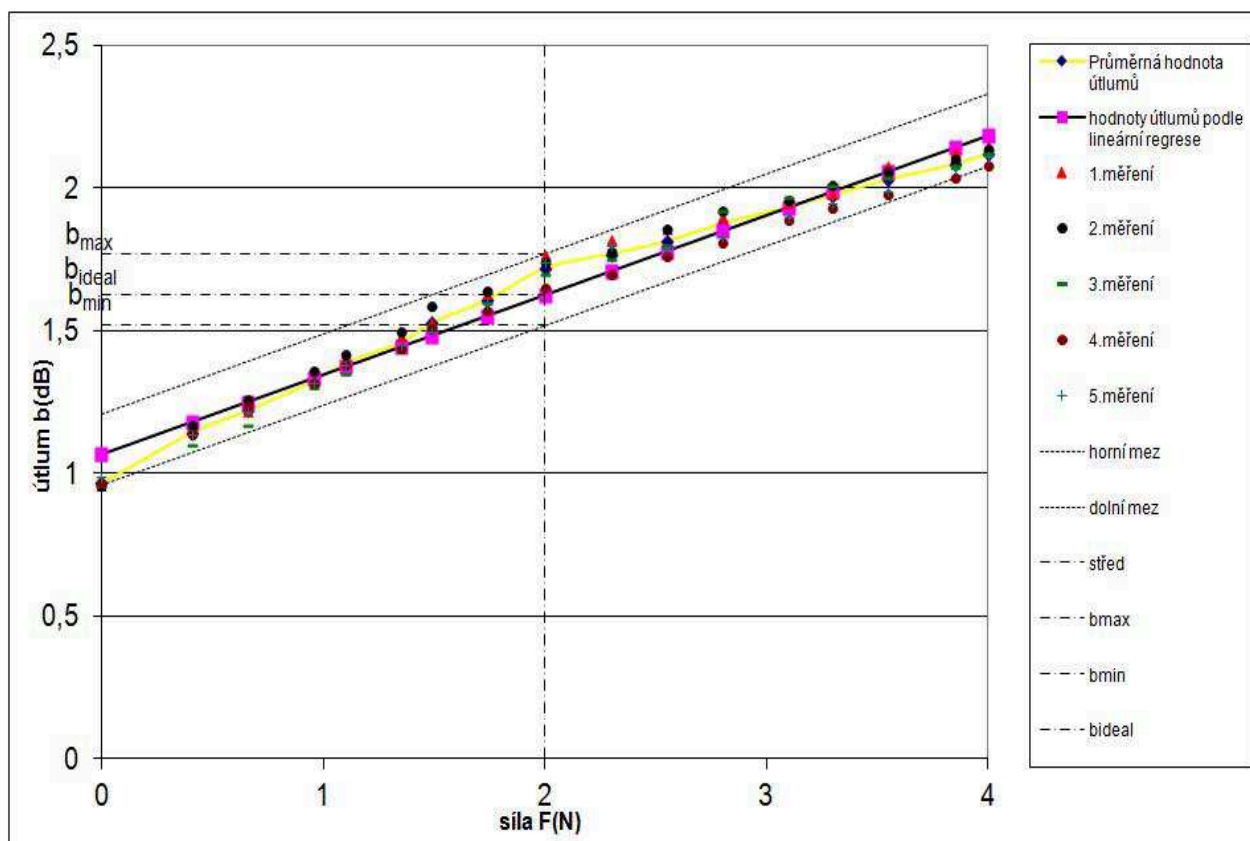
x_{n1} - průměrná hodnota útlumu uvedená se standardní nejistotou typu A v 1.bodě měření (dB)

x_{i1} - průměrná hodnota útlumu v 1.bodě měření (dB)

x_{in} - průměrná hodnota útlumu v n – tém bodě měření (dB)

nejistota typu A [dB]	$x_{in} \pm u_A$ [dB]
0,0082	$0,968 \pm 0,0082$
0,0180	$1,144 \pm 0,018$
0,0210	$1,222 \pm 0,02095$
0,0137	$1,326 \pm 0,0137$
0,0174	$1,388 \pm 0,0174$
0,0183	$1,46 \pm 0,0183$
0,0221	$1,53 \pm 0,0221$
0,0174	$1,608 \pm 0,0174$
0,0290	$1,72 \pm 0,0290$
0,0294	$1,77 \pm 0,0294$
0,0279	$1,814 \pm 0,0279$
0,0327	$1,876 \pm 0,0327$
0,0228	$1,934 \pm 0,0228$
0,0224	$1,976 \pm 0,0224$
0,0273	$2,03 \pm 0,0273$
0,0210	$2,084 \pm 0,0210$
0,0171	$2,12 \pm 0,0171$

Tabulka 7.3 Vypočítané hodnoty nejistot v jednotlivých bodech měření



graf 7.1 Charakteristika útlumů v závislosti na velikosti snímané síly

Zbývající naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze

7.5 Zhodnocení:

Provedl jsem návrh a realizaci makroohybového intenzitního VOS pro snímání síly. Senzor je spíše určen pro snímání větších sil, z důvodu nepatrné změny útlumu po přiložení dané zátěže na horní díl. Pokud bychom chtěli dosáhnout větší citlivosti senzoru, je nutné zmenšit poloměr makroohybů blížícímu se ke kritickému poloměru ohybu optického vlákna viz. rovnice 7.11 a 7.12.

U dvojného tažení vlákna přes senzor (24 ohybů) docházelo k větší chybovosti naměřených výsledků (tzn. vyšší relativní chyba a větší chybové pásmo) než u trojného tažení (36 ohybů). Důvodem byly malé nepřesnosti spojené s tažením vlákna přes makroohyby, horní díl byl lépe zafixován na trojném tažení vlákna, tzn. docházelo k rovnoměrnému rozložení ztrát světelné energie vyvolané makroohyby v každém měření.

Z hlediska porovnání citlivosti útlumů pro vlnové délky 850 a 1300 nm, se jeví senzor citlivější pro $\lambda_2=1300\text{nm}$, z důvodu většímu přiblížení kritickému poloměru ohybu vlákna.

[11, 14]kritický poloměr ohybu u GI vlákna pro $\lambda_1 = 850\text{nm}$

$$R_{c1} = \frac{3n_1\lambda_1}{4\pi\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} = \quad (7.11)$$

$$= \frac{3 \cdot 1,475 \cdot 850 \cdot 10^{-9}}{4\pi \cdot \sqrt{(1,475^2 - 1,461^2)^3}} = \frac{3,76125 \cdot 10^{-6}}{0,10467} \doteq 3,6 \cdot 10^{-5} m = 36 \mu m$$

[11, 14]kritický poloměr ohybu u GI vlákna pro $\lambda_2 = 1300nm$

$$R_{c2} = \frac{3n_1\lambda_2}{4\pi\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} = \quad (7.12)$$

$$= \frac{3 \cdot 1,475 \cdot 1300 \cdot 10^{-9}}{4\pi \cdot \sqrt{(1,475^2 - 1,461^2)^3}} = \frac{5,7525 \cdot 10^{-6}}{0,10467} \doteq 5,5 \cdot 10^{-5} m = 55 \mu m$$

R_{Cn} – kritický poloměr ohybu

n_1 – index lomu jádra

n_2 – index lomu pláště

λ_1, λ_2 – vlnová délka 850 a 1300nm

Z vypočítaných výsledků kritických poloměrů pro tyto dvě vlnové délky lze vyčíst, že pro $\lambda_2 = 1300nm$ platí větší kritický poloměr ohybu vlákna, tudíž se více přibližuje poloměru ohybu vlákna vyvolaný makroohybovými prvky na senzoru.

Z vypočítaných hodnot celkové citlivosti $k_1 - k_4$ vyplývá, že čím větší je počet tažení vlákna přes senzor, tím více snižujeme citlivost na působící sílu. Je to způsobeno tím, že mnohočetným tažením klesá citlivost vlákna na radiální posuv, vyvolaný působící silou na deformátor, tzn., že pokud chceme dosáhnout stejné celkové změny útlumu u trojného tažení, jako u dvojného, tak je zapotřebí zvýšit zátěž na deformátoru.

Na obrázku 7.5 je znázorněno upravené schéma zapojení pro měření větších sil. Před samotným měřením bylo nutné ukotvit celý senzor a upínací prvky na kovovou desku, důvodem byly:

a) Při pokládání větší zátěže než 400g (odpovídá působící síle 4N) docházelo k naklánění upínacího systému umístěného těsně za senzor, z důvodu silnějšího utahení vlákna v tomto prvku. Výsledkem bylo, že přestal narůstat útlum optického výkonu, vlivem blokace vlákna v prvku (nedocházelo k většímu ohybu vlákna v senzoru).

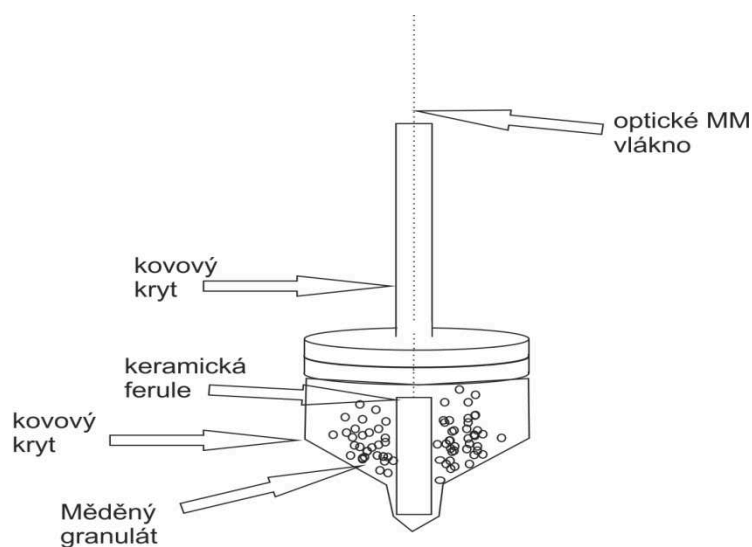
b) Při pokládání větší zátěže než 400g (odpovídá působící síle 4N) docházelo k velkým odchylkám útlumů v každém opakovaném měření. Příčinou bylo slabší utahení vlákna v upínacím prvku, tím docházelo k náklonu horního dílu senzoru a nerovnoměrnému ohybu optického vlákna v senzorové oblasti.

Z naměřených a vypočtených hodnot senzoru je patrné, že u tohoto zapojení docházelo k větší chybovosti a snížené citlivosti. Hlavní příčinou byla rozdílná síla utahení vlákna v upínacím prvku v každém měření. Naopak výhodou je zvětšený rozsah měřených sil. Odzkoušeno bylo zatížení do 3kg (30N). Hraniční mez měřitelnosti se odhaduje kolem 100N.

8 Spolupráce na měření vlnového spektra intenzitního VOS pro vysoké teploty

Přímé snímání vysoké teploty není vhodné, protože materiál VOS křehne, proto měření senzoru vychází z fyzikálního principu záření černého tělesa. Záření emitované černým tělesem je navázáno a přenášeno mnohovidovým optickým vláknem k detekční oblasti (v našem případě spektrometru). Na konci VOS se nachází keramická ferule, která se vloží do teplotně odolného kovového krytu (použitá ferule na konci vlákna má za úkol správné uložení do kovového krytu) viz. obrázek 8.1. Dále je do kovového krytu nasypán měděný granulát, z důvodu zjištění vlivu na vyzařované vlnové spektrum, při určité teplotě. Kovový kryt by měl splňovat několik fyzikálních vlastností: [12]

1. Musí být vynikající teplotní vodič, aby nevznikaly prodlevy mezi změnou okolní teploty a uvnitř krytu.
2. Teplota tání materiálu by měla být vyšší než teplota, pro kterou se bude senzor používat.
3. Minimální teplotní roztažnost kovového materiálu. [8, 12]



Obrázek 8.1 koncová část VOS umístěná ve vysokoteplotní peci

Použité přístroje a součásti :

Notebook s nainstalovaným programem Safibra DAS pro ovládání spektrometru, optické MM vlákno 62,5/125 μm , spektrometr, vysokoteplotní pec, kovový kryt, keramická ferule, měděný granulát

8.1 Postup měření:

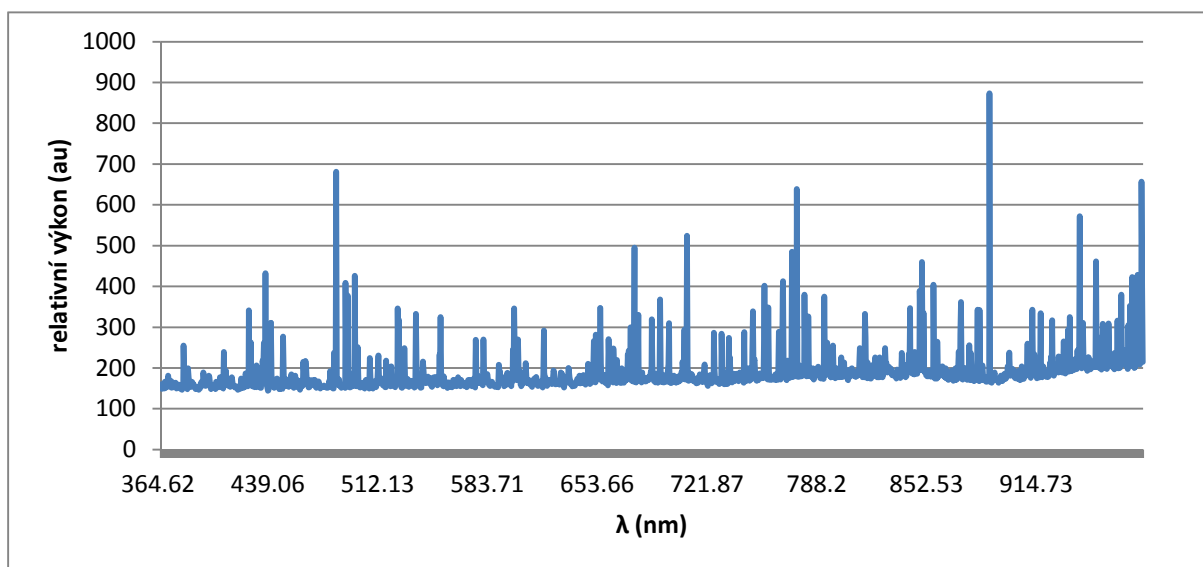
Připravený konec senzoru (obrázek 8.1) se vloží přes horní dutinu ve vysokoteplotní peci, dovnitř pece, kde je zachycen ve spodním stojanu ve vertikální poloze. Druhý konec senzoru

(optického MM vlákna) je vyveden z pece a za pomoci konektoru připojen ke spektrometru. Dále je spektrometr propojen USB kabelem k notebooku, odkud je ovládán programem Safibra DAS.

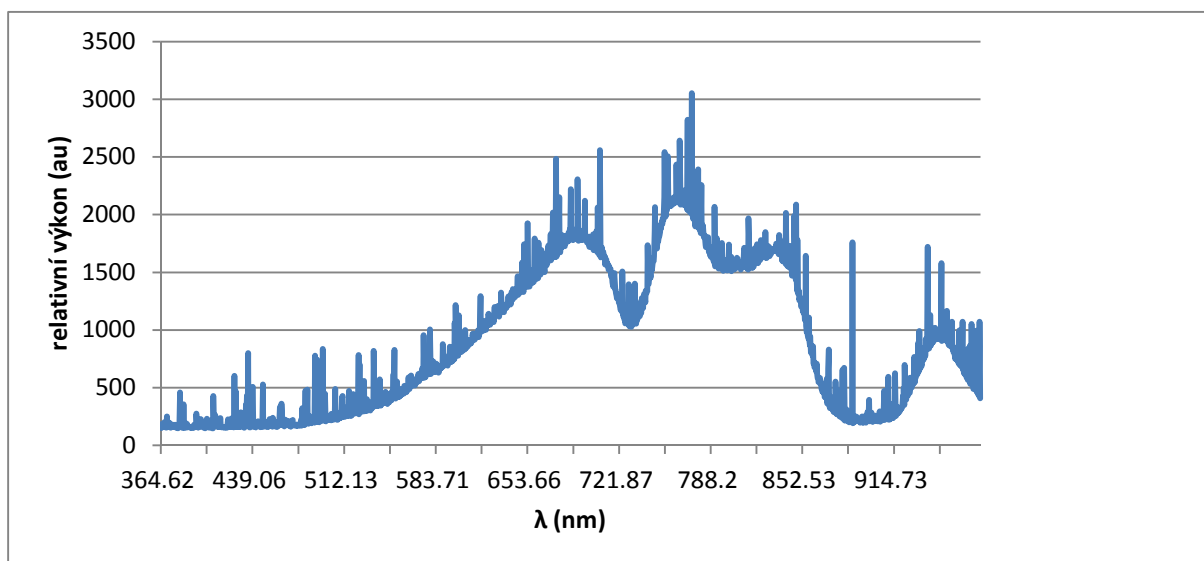
Po sestavení celé senzorové části jsme provedli nejprve konfiguraci a nastavení ukládání měřených dat programu DAS. Program zobrazoval výsledné vyzařované spektrum při dané teplotě. Postupně jsme tedy začali zvyšovat teplotu v peci. U prvního měření po hodnotu 1170 °C, u druhého a třetího měření do 1200 °C a u čtvrtého měření až po hodnotu 1220 °C. Četnost ukládání zobrazovaných dat byla přibližně po 30 °C do hodnoty 800 °C. Od této teploty se postupně začalo projevovat záření tělesa v peci, proto jsme začali ukládat data v rozmezí 5-15 stupňů. Taktéž se zvyšující se teplotou od této prahové hodnoty, začala stoupat intenzita vyzařovaného spektra (podle Stefan-Boltzmanova zákona intenzita záření roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty). To znamená, že i nepatrná změna teploty vyvolala větší intenzitu spektra záření černého tělesa. [12]

8.2 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, grafy:

1. měření



graf 8.1 celková vlnová spektrální charakteristika při teplotě 830°C



graf 8.2 celková vlnová spektrální charakteristika při teplotě 1167°C

Zbývající naměřené grafy z jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze

8.3 Zhodnocení

Z naměřených výsledků vyplývá, že se záření černého tělesa začalo projevovat u hodnoty kolem 830°C graf 8.1. Vliv na celkové vyzařované spektrum tělesa měl měděný granulát, který se při teplotě kolem 1080°C roztavil a způsobil mírné utlumení záření, vlivem nižší emisivity v roztaveném stavu, než je emisivita kovového obalu (roztavená měď $\varepsilon = 0,16$ a ocel-zoxidovaná $\varepsilon = 0,8$).

Z grafu 8.2 lze vypočítat, že celková intenzita záření dosahuje nejvyšších hodnot v blízké infračervené oblasti, při teplotě 1167°C.

Celkově se měření provedlo 4x, přičemž největší intenzity záření se dosahovalo u 1. měření. U dalších měření intenzita postupně klesala (viz. grafy z měření 1-4 při teplotě 1135°C v příloze). Tento jev způsobovala teplotní roztažnost mědi uvnitř pece.

9 Vyhodnocení a praktické využití realizovaných senzorů

Makroohybový senzor

Využitelnost realizovaného makroohybového senzoru v průmyslu je možné rozdělit podle několika kritérií:

Pokud vyžadujeme vysokou přesnost měření a velmi malé chybové pásmo, pak je nejlepší volbou trojné tažení optického vlákna přes senzor a použitá vlnová délka optického zdroje 850nm.

Nevýhody:

Trojné tažení vlákna zaručuje danou chybovost pouze do hodnoty přiložené zátěže 400g. Při vyšší zátěži se začnou projevovat problémy, které jsou popsány ve zhodnocení senzoru.

Trojné tažení vlákna mírně snižuje celkovou citlivost útlumu optického výkonu, v závislosti na působící síle.

Pokud vyžadujeme vysoký rozsah měřených sil (sníženou citlivost), je doporučeno použít upravenou verzi senzoru s přidáním spodního dílem, na kterém je ukotven celý senzor spolu s upínacími prvky. Teoretický odhad maximální měřené síly je cca 100 N.

Nevýhody:

Přidáním spodního dílu se zvýšila chybovost senzoru. Hlavní příčinou tohoto nežádoucího vlivu je síla utažení vlákna v upínacím prvku. Možným řešením snížení chybovosti je stanovení pracovní oblasti, ve které by se naměřené výsledky minimálně vychylovaly od ideální charakteristiky. Výčtem z výsledných grafů dvou vlnových délek je patrné, že se nejvíce vychylovaly hodnoty útlumů při zátěži do 400 gramů. Tato hodnota je vhodným kandidátem na stanovení dolního bodu pracovní oblasti.

Významný vliv na celkovou funkci a přesnost senzoru, měl proces výroby. Přesněji ruční výroba, při které je nutné vynaložit značné úsilí z hlediska přesnosti a rovnoměrnosti senzoru (např. makroohyby by měly mít stejné rozteče mezi sebou atd.). Proto bych doporučil pro dosažení větší přesnosti a rovnoměrnosti senzoru, automatizovanou strojní výrobu.

Teplotní VOS

Hlavní uplatnění proměřeného intenzitního VOS s generací záření pro snímání vysokých teplot, se nachází v automobilovém průmyslu. Např. měření teploty hlavy válců, teplota výstupního výfukového plynu před a za katalyzátorem [8]. Velký vliv na celkovou spektrální charakteristiku při daných teplotách měla měď, která při opakovaném zahřívání a chladnutí měnila své fyzikální vlastnosti. Aplikace senzoru je omezena tedy použitým měděným granulátem, který způsobuje při každém opakovaném měření teploty rozdílné výsledky vyzařovaného spektra. Obzvláště pokud se každé nové měření teploty provádí od nižších teplot kolem 180°C. Ukázkovým příkladem může být 2. a 3. měření (hodnoty při teplotě 1135°C), kdy se výsledné spektra záření v těchto měřeních minimálně

odlišovaly, právě díky vyšší počáteční teplotě (600°C). Naopak porovnáním měření 3 a 4 můžeme vidět podstatný pokles světelné radiace, z důvodu nízké počáteční teploty cca 180°C.

U tohoto senzoru jsem pouze asistoval při měření, tzn. neprováděl jsem jeho návrh a zapojení. Proto jsou zde uvedeny citace z externích zdrojů. Hlavním cílem praktické části je tedy návrh a realizace makroohybového senzoru.

Použitá literatura

[1] Optická vlákna. DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 3.díl: Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha: BEN, 2005, s. 110, 112, 113, 114, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 128, 129, 130. ISBN 80-7300-184-5.

[2] Fundamentals of Optical Devices: Optical fibers. HUI, Rongqing a Maurice O'SULLIVEN. *Fiber Optic Measurement Techniques*. USA: Elsevier Academic Press, 2009, s. 44. ISBN 978-0-12-373865-3.

[3] SENIOR, John M. a M.Yousif JAMRO. *Optical Fiber Communications Principles and Practice*. Third edition. Edinburgh Gate, Harlow: Pearson Education Limited, 2009, s. 110, 218, 234, 244, 246. ISBN 978-0-13-032681-2.

[4] VAŠINEK, Vladimír. Přednášky Optoelektronika pro mobilní komunikace: Optické vlnovody a světlovody, Módová a chromatická disperze, Optické zdroje. Katedra telekomunikační techniky, 2011.

[5] CRISP, John a Barry ELLIOTT. Connectors. *Introduction to fiber optics*. third edition. Great Britain, Oxford: Newnes, 2005, s. 113, 114. ISBN 0 7506 67567.

[6] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. Cantabria, Spain: John Wiley & Sons, Ltd, 2002, s. 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14, 163. ISBN 0-471-82053-9.

[7] UDD, Eric a William B. SPILLMAN JR. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Second Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2011, s. 10, 35, 37, 44, 45, 49, 50 ISBN 978-0-470-12684-4.

[8] ŠIŠKA, Petr. VĚDECKÝ TÝM OPTICKÉ KOMUNIKACE A OPTOELEKTRONIKY. *Nekomunikační aplikace optických vláken*. VŠB-TUO, FEI - katedra telekomunikační techniky.

[9] SALEH, Bahaa E.A. a Malvin CARL TEICH. *Základy fotoniky: svazek 3*. Matematicko-fyzikální fakulty University Karlovy: Matfyzpress, 1991. ISBN 80-85863-00-6.

[10] SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav HAVRÁNEK. Chyby a nejistoty měření: doplňující text k laboratornímu cvičení. In: [Http://fyzika.upol.cz/](http://fyzika.upol.cz/) [online]. - [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>

[11] BEJČEK, Ludvík. Vláknová optika v řídicí a měřicí technice. In: [Http://www.umel.feec.vutbr.cz](http://www.umel.feec.vutbr.cz) [online]. VUT - Brno, 1.8.2002 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/bc/Vlaknova_optika_prednasky.pdf

[12] HANÁČEK, František, Jan LÁTAL, Petr KOUDELKA, Jan SKAPA, Petr ŠIŠKA, Vladimír VAŠÍNEK a Jan HURTA. Fiber optic sensor. In: *VLÁKNOVĚ OPTICKÝ SENZOR PRO VYSOKÉ TEPLoty* [online]. Katedra telekomunikační techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika, březen 2010 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://advances.uniza.sk/index.php/AEEE/article/view/9/641>

[13] (bandwidth of an optical fibre) šířka pásma optického vlákna. In: *WDM SYSTEM SUMMIT 2012* [online]. 2010 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.wdmsummit.cz/nabidka/wdm-technologie/slovník-pojmu-v-oblasti-wdm-technologie/bandwidth-of-an-optical-fibre-sirka-pasma-optickeho-vlakna.htm>

[14] DONLAGIC, Denis a Brian CULSHAW. Propagation of the Fundamental Mode in Curved Graded Index Multimode Fiber and Its Application in Sensor Systems. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*. March 2000, č. 3, s. 334-342.

Přílohy

V této příloze jsou uvedeny veškeré naměřené a vypočtené hodnoty z obou senzorů.

Seznam příloh

Příloha A: Makroohybový senzor: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, grafy

Příloha B: Naměřené hodnoty VOS pro snímání vysokých teplot

Příloha A: Makroohybový senzor: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, grafy

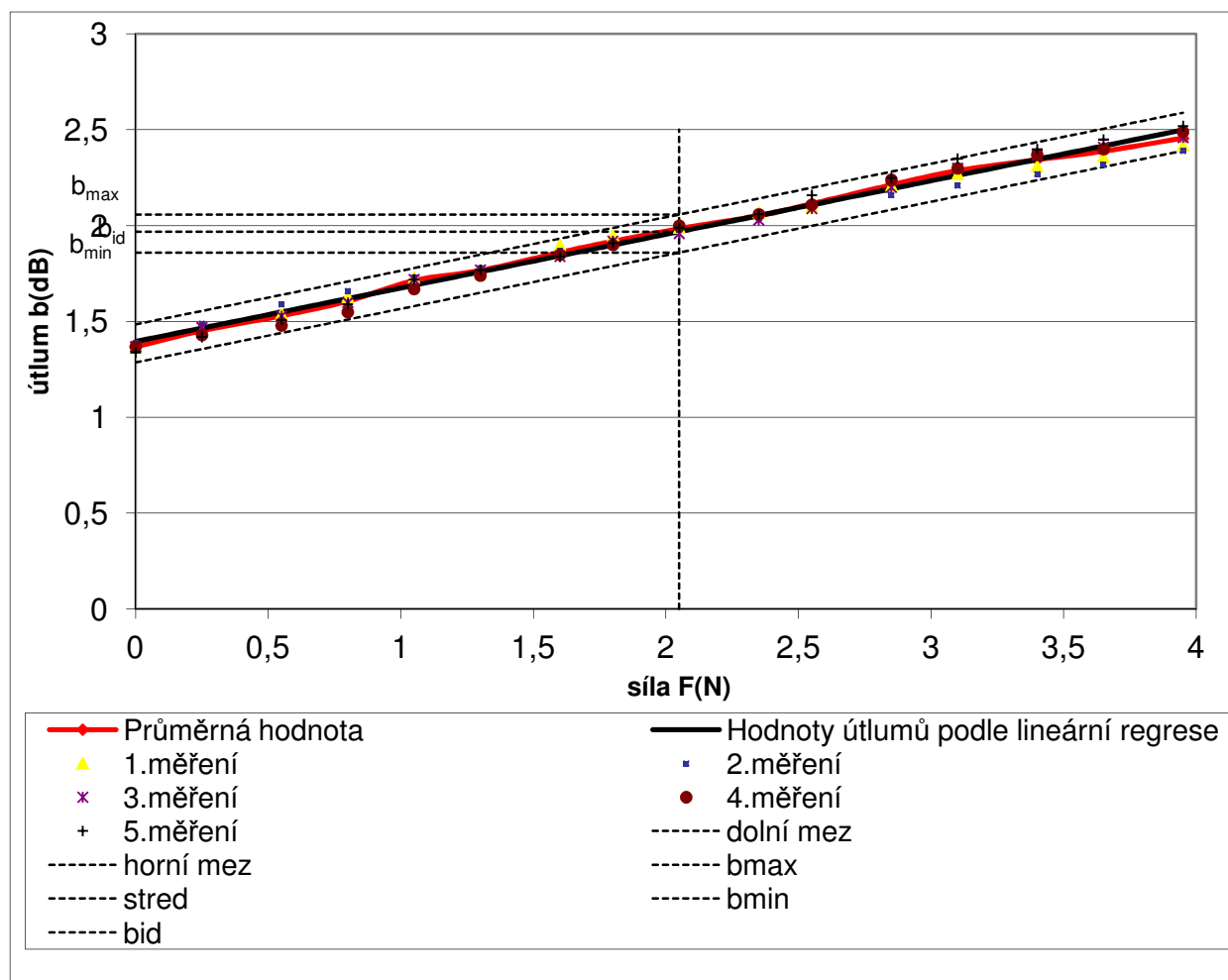
a) $\lambda_1 = 850\text{nm}$

<i>Dvojitě tažení vlákna</i>	<i>1.měření</i>	<i>2.měření</i>	<i>3.měření</i>	<i>4.měření</i>	<i>5.měření</i>
<i>síla $F(N)$</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>
0	0,96	0,96	0,96	0,97	0,99
0,41	1,17	1,17	1,1	1,14	1,14
0,66	1,22	1,26	1,17	1,24	1,22
0,96	1,33	1,36	1,3	1,32	1,32
1,1	1,41	1,42	1,35	1,38	1,38
1,35	1,48	1,5	1,43	1,44	1,45
1,49	1,53	1,59	1,52	1,51	1,5
1,74	1,63	1,64	1,6	1,57	1,6
2	1,77	1,74	1,7	1,65	1,74
2,3	1,82	1,78	1,75	1,7	1,8
2,55	1,86	1,86	1,8	1,76	1,79
2,8	1,9	1,92	1,92	1,81	1,83
3,1	1,95	1,96	1,97	1,89	1,9
3,3	1,98	2,01	2,01	1,93	1,95
3,55	2,08	2,06	2,04	1,98	1,99
3,85	2,13	2,1	2,08	2,04	2,07
4	2,15	2,14	2,12	2,08	2,11

<i>Trojité tažení vlákna</i>	<i>1.měření</i>	<i>2.měření</i>	<i>3.měření</i>	<i>4.měření</i>	<i>5.měření</i>		
<i>síla F(N)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>Průměrná hodnota útlumu (dB)</i>	<i>Hodnoty útlumů (dB) podle lineární regrese</i>
0	1,37	1,39	1,37	1,37	1,34	1,368	1,395065
0,25	1,45	1,49	1,47	1,43	1,42	1,452	1,464896
0,55	1,54	1,59	1,53	1,48	1,51	1,53	1,548695
0,8	1,63	1,66	1,6	1,55	1,59	1,606	1,618526
1,05	1,73	1,73	1,72	1,67	1,72	1,714	1,688358
1,3	1,77	1,78	1,77	1,74	1,77	1,766	1,75819
1,6	1,9	1,87	1,84	1,85	1,84	1,86	1,841988
1,8	1,95	1,91	1,92	1,9	1,91	1,918	1,897853
2,05	1,99	1,98	1,96	2	1,99	1,984	1,967685
2,35	2,07	2,04	2,03	2,06	2,06	2,052	2,051483
2,55	2,1	2,11	2,09	2,11	2,16	2,114	2,107348
2,85	2,21	2,16	2,2	2,24	2,25	2,212	2,191146
3,1	2,27	2,21	2,3	2,3	2,35	2,286	2,260978
3,4	2,31	2,27	2,37	2,37	2,4	2,344	2,344776
3,65	2,36	2,32	2,41	2,4	2,45	2,388	2,414608
3,95	2,42	2,39	2,46	2,49	2,52	2,456	2,498406

<i>Nejistota typu A (dB)</i>	<i>$x_{in} \pm u_A$ (dB)</i>
<i>0,0112</i>	<i>1,368 ± 0,0112</i>
<i>0,0179</i>	<i>1,452 ± 0,0179</i>
<i>0,0254</i>	<i>1,53 ± 0,0254</i>
<i>0,0260</i>	<i>1,606 ± 0,0260</i>
<i>0,0157</i>	<i>1,714 ± 0,0157</i>
<i>0,0095</i>	<i>1,766 ± 0,0095</i>
<i>0,0160</i>	<i>1,86 ± 0,0160</i>
<i>0,0120</i>	<i>1,918 ± 0,0120</i>
<i>0,0095</i>	<i>1,984 ± 0,0095</i>
<i>0,0103</i>	<i>2,052 ± 0,0103</i>
<i>0,0169</i>	<i>2,114 ± 0,0169</i>
<i>0,0223</i>	<i>2,212 ± 0,0223</i>
<i>0,0321</i>	<i>2,286 ± 0,0321</i>
<i>0,0330</i>	<i>2,344 ± 0,0330</i>
<i>0,0311</i>	<i>2,388 ± 0,0311</i>
<i>0,0327</i>	<i>2,456 ± 0,0327</i>

Vypočítané hodnoty nejistot v jednotlivých bodech měření (trojité tažení vlákna)



Charakteristika útlumů v závislosti na velikosti snímané síly (trojitě tažení vlákna)

Příklad výpočtu průměru jednoho bodu:

Souřadnice bodu [2,05 ; 1,984], kde 2,05 je hodnota síly F (N) působící na vlákno a 1,984 je hodnota útlumu (dB) vyvolaná touto silou.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} = \frac{1,99 + 1,98 + 1,96 + 2 + 1,99}{5} = 1,984 \text{ dB}$$

x - průměrná hodnota,

$x_1 - x_5$ - hodnoty útlumů v měřeních 1 až 5

$n = 5$ - počet provedených měření senzoru

Odchyly, tolerance chyb

Maximální vyšší odchylna

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_m je maximální vyšší odchylna, b_{max} - nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} - ideální hodnota útlumu.

$$O_m = |b_{max} - b_{ideal}| = |2,35 - 2,260977976| \doteq 0,08902 \text{ dB}$$

Maximální nižší odchylka

Rozdíl nejnižší a ideální hodnoty útlumu, kde O_n je maximální nižší odchylka, b_{\min} – nejnižší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_n = |b_{\min} - b_{ideal}| = |2,39 - 2,498405794| \doteq 0,1084 dB$$

Po zjištění odchylek určíme toleranci chyb jako součet maximální vyšší odchylky a maximální nižší odchylky.

$$T = O_m + O_n = 0,08902 + 0,1084 \doteq 0,1974 dB$$

Absolutní a relativní chyba senzoru pro:

Absolutní chyba:

$$\Delta = \Delta x_m - \Delta x_{id} = |1,088 - 1,103| = 0,015 dB$$

Δ – absolutní chyba senzoru (dB), Δx_m – rozsah hodnot průměrného útlumu (dB), Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu (dB)

Relativní chyba:

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta x_{id}} \cdot 100 = \frac{0,015}{1,103} \cdot 100 \doteq 1,36\%$$

δ – relativní chyba senzoru v %, Δ – absolutní chyba senzoru, Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu

Citlivost senzoru k

$$k_3 = \frac{\Delta b}{\Delta F} = \frac{1,088}{3,95} \doteq 0,2754 dB \cdot N^{-1}$$

Δb – velikost změny útlumu (dB)

ΔF – velikost změny působící síly (N)

Výpočet standardní nejistoty měření typu A

Příklad výpočtu:

$$\begin{aligned} u_A &= k \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \Sigma (\Delta x_m)^2} = \\ &= 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} [(1,37 - 1,368)^2 + (1,39 - 1,368)^2 + \dots + (1,34 - 1,368)^2]} \doteq 0,0112 \end{aligned}$$

$$x_{n1} = x_{i1} \pm u_A = 1,368 \pm 0,0112 \text{ dB}$$

u_A – standardní nejistota typu A (dB)

k – koeficient rozšíření

n – počet měření

Δx_m – rozdíl naměřené hodnoty útlumu v 1. až 5. měření a průměrné hodnoty útlumu z těchto 5-ti měření (dB)

x_{n1} – průměrná hodnota útlumu uvedená se standardní nejistotou typu A v 1.bodě měření (dB)

x_{i1} – průměrná hodnota útlumu v 1.bodě měření (dB)

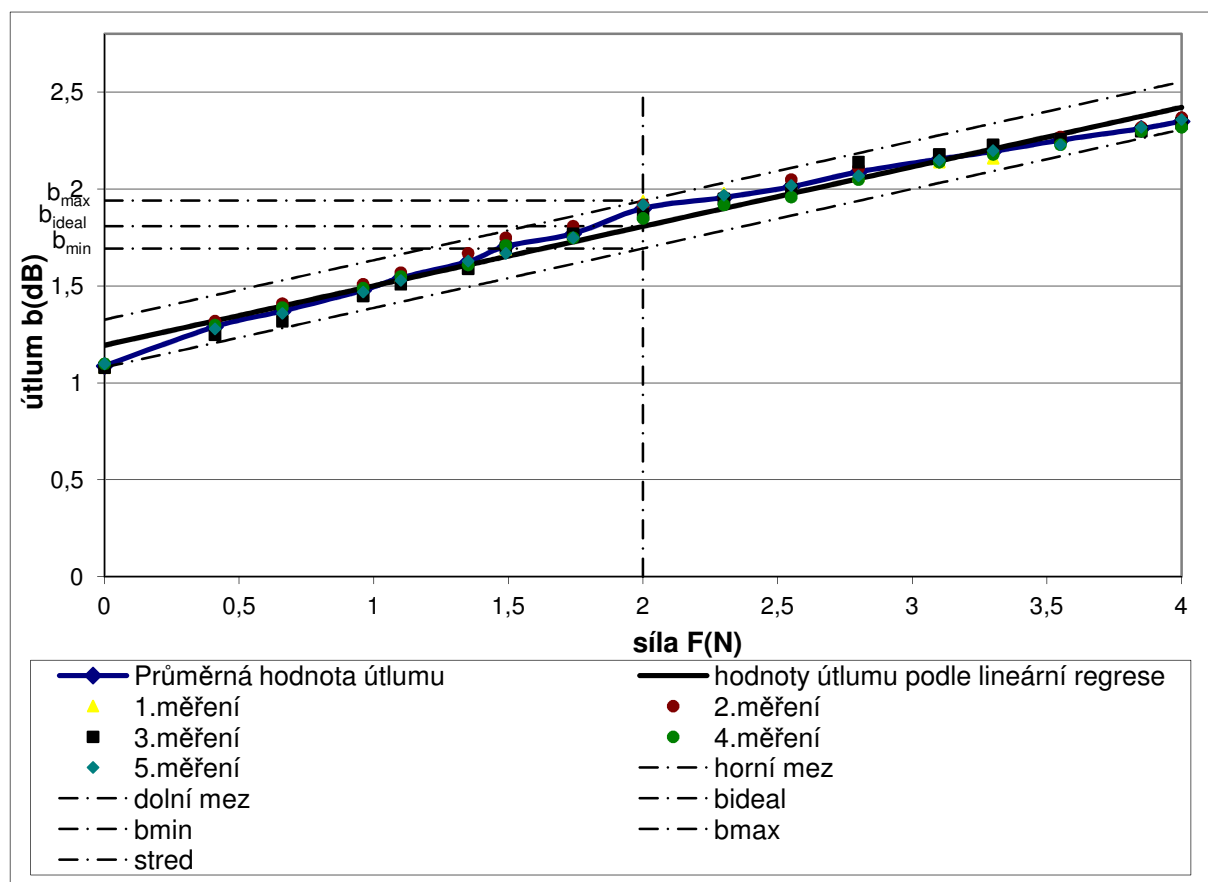
x_{in} – průměrná hodnota útlumu v n – tém bodě měření (dB)

b) $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$

Dvojitě tažení vlákna	1.měření	2.měření	3.měření	4.měření	5.měření		
<i>síla F(N)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>Průměrná hodnota útlumu (dB)</i>	<i>Hodnoty útlumů podle lineární regrese</i>
0	1,08	1,08	1,08	1,1	1,1	1,088	1,194276437
0,41	1,3	1,32	1,25	1,3	1,28	1,29	1,320020272
0,66	1,37	1,41	1,32	1,39	1,36	1,37	1,396693342
0,96	1,47	1,51	1,45	1,49	1,47	1,478	1,488701026
1,1	1,55	1,57	1,51	1,55	1,53	1,542	1,531637945
1,35	1,63	1,67	1,59	1,61	1,63	1,626	1,608311015
1,49	1,69	1,75	1,7	1,71	1,67	1,704	1,651247934
1,74	1,77	1,81	1,77	1,75	1,75	1,77	1,727921005
2	1,94	1,92	1,87	1,85	1,92	1,9	1,807660997
2,3	1,98	1,96	1,95	1,92	1,97	1,956	1,899668681
2,55	2,03	2,05	2	1,96	2,02	2,012	1,976341751
2,8	2,07	2,11	2,14	2,05	2,07	2,088	2,053014822
3,1	2,14	2,16	2,18	2,14	2,15	2,154	2,145022506
3,3	2,16	2,2	2,23	2,18	2,2	2,194	2,206360962
3,55	2,27	2,27	2,26	2,23	2,23	2,252	2,283034032
3,85	2,32	2,32	2,3	2,3	2,32	2,312	2,375041716
4	2,36	2,37	2,34	2,32	2,36	2,35	2,421045558

<i>nejistota typu A</i> (dB)	$x_{in} \pm u_A$ (dB)
0,0069	1,088 ± 0,0069
0,0166	1,29 ± 0,0166
0,0212	1,37 ± 0,0212
0,0143	1,478 ± 0,0143
0,0143	1,542 ± 0,0143
0,0186	1,626 ± 0,0186
0,0186	1,704 ± 0,0186
0,0153	1,77 ± 0,0153
0,0238	1,9 ± 0,0238
0,0144	1,956 ± 0,0144
0,0214	2,012 ± 0,0214
0,0227	2,088 ± 0,0227
0,0105	2,154 ± 0,0105
0,0163	2,194 ± 0,0163
0,0128	2,252 ± 0,0128
0,0069	2,312 ± 0,0069
0,0125	2,35 ± 0,0125

Vypočítané hodnoty nejistot v jednotlivých bodech měření (dvojitě tažení vlákna)



Charakteristika útlumů v závislosti na velikosti snímané síly (dvojitě tažení vlákna)

Příklad výpočtu průměru jednoho bodu:

Souřadnice bodu [2 ; 1,9], kde 2 je hodnota síly F (N) působící na vlákno a 1,9 je hodnota útlumu (dB) vyvolaná touto silou.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} = \frac{1,94 + 1,92 + 1,87 + 1,85 + 1,92}{5} = 1,9 \text{ dB}$$

x - průměrná hodnota,

$x_1 - x_5$ - hodnoty útlumů v měřeních 1 až 5

$n = 5$ - počet provedených měření senzoru

Odchyly, tolerance chyb

Maximální vyšší odchylka

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_m je maximální vyšší odchylka, b_{\max} - nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} - ideální hodnota útlumu.

$$O_m = |b_{\max} - b_{\text{ideal}}| = |1,94 - 1,807660997| \doteq 0,1323 \text{ dB}$$

Maximální nižší odchylka

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_n je maximální nižší odchylka, b_{\min} – nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_n = |b_{\min} - b_{ideal}| = |1,08 - 1,194276437| \doteq 0,1143 dB$$

Po zjištění odchylek určíme toleranci chyb jako součet maximální vyšší odchylky a maximální nižší odchylky.

$$T = O_m + O_n = 0,1323 + 0,1143 = 0,2466 dB$$

Absolutní a relativní chyba senzoru pro:

Absolutní chyba:

$$\Delta = \Delta x_m - \Delta x_{id} = 1,262 - 1,227 = 0,035 dB$$

Δ – absolutní chyba senzoru (dB), Δx_m – rozsah hodnot průměrného útlumu (dB), Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu (dB)

Relativní chyba:

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta x_{id}} \cdot 100 = \frac{0,035}{1,227} \cdot 100 = 2,85\%$$

δ – relativní chyba senzoru v %, Δ – absolutní chyba senzoru (dB), Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu (dB)

Citlivost senzoru k

$$k_2 = \frac{\Delta b}{\Delta F} = \frac{1,262}{4} = 0,3155 dB \cdot N^{-1}$$

Δb – velikost změny útlumu (dB)

ΔF – velikost změny působící síly (N)

Výpočet standardní nejistoty měření typu A

Příklad výpočtu:

$$u_A = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \Sigma(\Delta x_m)^2} =$$

$$= 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} \left[(1,08 - 1,088)^2 + (1,08 - 1,088)^2 + \dots + (1,1 - 1,088)^2 \right]} \doteq 0,0069$$

$$x_{n1} = x_{i1} \pm u_A = 1,088 \pm 0,0069 \text{ dB}$$

u_A – standardní nejistota typu A (dB)

k – koeficient rozšíření

n – počet měření

Δx_m – rozdíl naměřené hodnoty útlumu v 1. až 5. měření a průměrné hodnoty útlumu z těchto 5-ti měření (dB)

x_{n1} – průměrná hodnota útlumu uvedená se standardní nejistotou typu A v 1.bodě měření (dB)

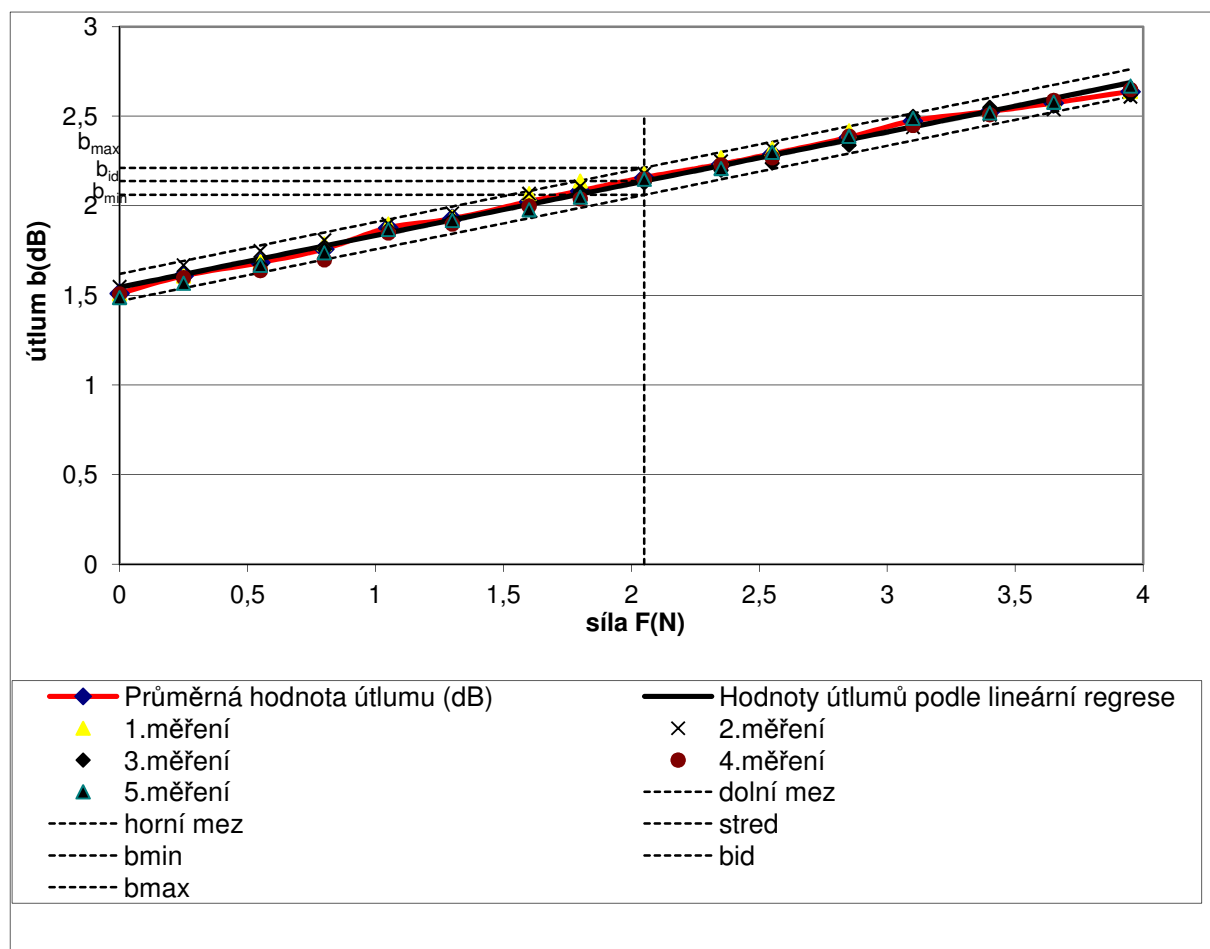
x_{i1} – průměrná hodnota útlumu v 1.bodě měření (dB)

x_{in} – průměrná hodnota útlumu v n – tém bodě měření (dB)

<i>Trojité tažení vlákna</i>	<i>1.měření</i>	<i>2.měření</i>	<i>3.měření</i>	<i>4.měření</i>	<i>5.měření</i>		
<i>síla F(N)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>útlum (dB)</i>	<i>Průměrná hodnota útlumu (dB)</i>	<i>Hodnoty útlumů podle lineární regrese</i>
0	1,51	1,55	1,5	1,51	1,49	1,512	1,545172
0,25	1,61	1,67	1,6	1,6	1,57	1,61	1,617422
0,55	1,69	1,75	1,67	1,64	1,67	1,684	1,704122
0,8	1,79	1,81	1,76	1,7	1,74	1,76	1,776372
1,05	1,9	1,9	1,87	1,85	1,87	1,878	1,848622
1,3	1,94	1,96	1,92	1,9	1,92	1,928	1,920872
1,6	2,07	2,07	2	2	1,98	2,024	2,007572
1,8	2,14	2,11	2,08	2,04	2,05	2,084	2,065372
2,05	2,18	2,18	2,13	2,15	2,15	2,158	2,137622
2,35	2,27	2,25	2,2	2,23	2,21	2,232	2,224322
2,55	2,32	2,32	2,24	2,27	2,3	2,29	2,282122
2,85	2,42	2,37	2,34	2,39	2,39	2,382	2,368822
3,1	2,49	2,44	2,5	2,45	2,49	2,474	2,441072
3,4	2,54	2,51	2,55	2,51	2,52	2,526	2,527772
3,65	2,59	2,54	2,57	2,59	2,58	2,574	2,600022
3,95	2,64	2,61	2,62	2,65	2,67	2,638	2,686722

<i>Nejistota typu A (dB)</i>	<i>$x_{in} \pm u_A$ (dB)</i>
0,0143	1,512 ± 0,0143
0,0230	1,61 ± 0,0230
0,0257	1,684 ± 0,0257
0,0269	1,76 ± 0,0269
0,0136	1,878 ± 0,0136
0,0143	1,928 ± 0,0143
0,0268	2,024 ± 0,0268
0,0260	2,084 ± 0,0260
0,0136	2,158 ± 0,0136
0,0179	2,232 ± 0,0179
0,0217	2,29 ± 0,0217
0,0185	2,382 ± 0,0185
0,0169	2,474 ± 0,0169
0,0114	2,526 ± 0,0114
0,0130	2,574 ± 0,0130
0,0149	2,638 ± 0,0149

Vypočítané hodnoty nejistot v jednotlivých bodech měření (trojité tažení vlákna)



Charakteristika útlumů v závislosti na velikosti snímané síly (trojitě tažení vlákna)

Příklad výpočtu průměru jednoho bodu:

Souřadnice bodu [2,05 ; 2,158], kde 2,05 je hodnota síly F (N) působící na vlákno a 2,158 je hodnota útlumu (dB) vyvolaná touto silou.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} = \frac{2,18 + 2,18 + 2,13 + 2,15 + 2,15}{5} = 2,158 \text{ dB}$$

x - průměrná hodnota,

$x_1 - x_5$ - hodnoty útlumů v měřeních 1 až 5

$n = 5$ - počet provedených měření senzoru

Odchylky, tolerance chyb

Maximální vyšší odchylka

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_m je maximální vyšší odchylka, b_{\max} - nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} - ideální hodnota útlumu.

$$O_m = |b_{\max} - b_{\text{ideal}}| = |2,14 - 2,06537189| \doteq 0,0746 \text{ dB}$$

Maximální nižší odchylka

Rozdíl nejnižší a ideální hodnoty útlumu, kde O_n je maximální nižší odchylka, b_{\min} – nejnižší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_n = |b_{\min} - b_{ideal}| = |1,7 - 1,77637205| \doteq 0,0764 \text{ dB}$$

Po zjištění odchylek určíme toleranci chyb jako součet maximální vyšší odchylky a maximální nižší odchylky.

$$T = O_m + O_n = 0,0746 + 0,0764 = 0,151 \text{ dB}$$

Absolutní a relativní chyba senzoru pro:

Absolutní chyba:

$$\Delta = \Delta x_m - \Delta x_{id} = |1,126 - 1,142| = 0,016 \text{ dB}$$

Δ – absolutní chyba senzoru (dB), Δx_m – rozsah hodnot průměrného útlumu (dB), Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu (dB)

Relativní chyba:

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta x_{id}} \cdot 100 = \frac{0,016}{1,142} \cdot 100 = 1,4\%$$

δ – relativní chyba senzoru v %, Δ – absolutní chyba senzoru, Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu

Citlivost senzoru k

$$k_4 = \frac{\Delta b}{\Delta F} = \frac{1,126}{3,95} \doteq 0,2851 \text{ dB} \cdot \text{N}^{-1}$$

Δb – velikost změny útlumu (dB)

ΔF – velikost změny působící síly (N)

Výpočet standardní nejistoty měření typu A

Příklad výpočtu:

$$\begin{aligned} u_A &= k \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \Sigma(\Delta x_m)^2} = \\ &= 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} [(1,51 - 1,512)^2 + (1,55 - 1,512)^2 + \dots + (1,49 - 1,512)^2]} \doteq 0,0143 \end{aligned}$$

$$x_{n1} = x_{i1} \pm u_A = 1,512 \pm 0,0143 \text{ dB}$$

u_A – standardní nejistota typu A (dB)

k – koeficient rozšíření

n – počet měření

Δx_m - rozdíl naměřené hodnoty útlumu v 1. až 5. měření a průměrné hodnoty útlumu z těchto 5-ti měření (dB)

x_{n1} - průměrná hodnota útlumu uvedená se standardní nejistotou typu A v 1.bodě měření (dB)

x_{i1} - průměrná hodnota útlumu v 1.bodě měření (dB)

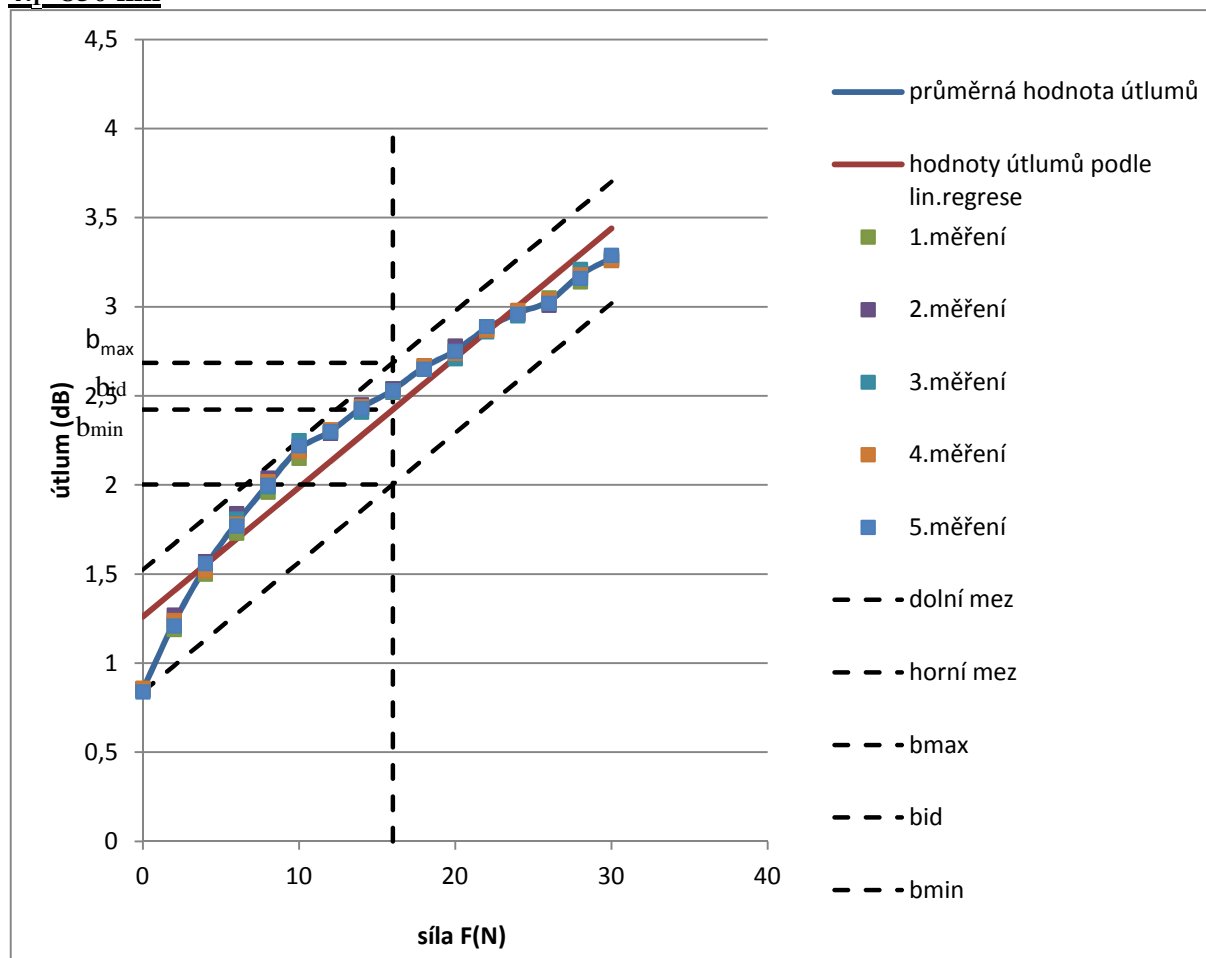
x_{in} - průměrná hodnota útlumu v n – tém bodě měření (dB)

c) naměřené a vypočtené hodnoty při upraveném zapojení pro zjištění maximálního zatížení (dvojitě tažení)

1.měření			2.měření		3.měření		4.měření		5.měření	
<i>síla F(N)</i>	<i>útlum (dB), 850nm</i>	<i>útlum (dB), 1300nm</i>	<i>útlum (dB), 850nm</i>	<i>útlum (dB), 1300nm</i>	<i>útlum (dB), 850nm</i>	<i>útlum (dB), 1300nm</i>	<i>útlum (dB), 850nm</i>	<i>útlum (dB), 1300nm</i>	<i>útlum (dB), 850nm</i>	<i>útlum (dB), 1300nm</i>
0	0,86	0,92	0,85	0,95	0,85	0,96	0,86	0,93	0,84	0,94
2	1,19	1,26	1,27	1,35	1,22	1,32	1,24	1,3	1,21	1,29
4	1,5	1,57	1,57	1,65	1,54	1,64	1,52	1,62	1,56	1,59
6	1,73	1,79	1,84	1,9	1,81	1,88	1,78	1,84	1,77	1,83
8	1,96	2	2,04	2,1	1,99	2,05	2,02	2,07	2	2,06
10	2,15	2,19	2,2	2,26	2,25	2,29	2,19	2,22	2,22	2,26
12	2,3	2,35	2,29	2,36	2,3	2,35	2,31	2,37	2,3	2,36
14	2,43	2,48	2,45	2,52	2,41	2,47	2,44	2,5	2,43	2,49
16	2,54	2,58	2,54	2,6	2,52	2,58	2,53	2,61	2,53	2,62
18	2,66	2,7	2,67	2,73	2,65	2,72	2,67	2,73	2,65	2,74
20	2,78	2,81	2,78	2,84	2,71	2,79	2,74	2,82	2,75	2,8
22	2,88	2,91	2,89	2,95	2,86	2,94	2,87	2,94	2,89	2,93
24	2,97	3	2,96	3,02	2,95	3,01	2,98	3,02	2,96	3,01
26	3,05	3,08	3,01	3,06	3,03	3,05	3,04	3,08	3,02	3,1
28	3,14	3,19	3,2	3,26	3,21	3,25	3,18	3,24	3,16	3,22
30	3,27	3,35	3,26	3,3	3,28	3,32	3,26	3,32	3,29	3,31

	<i>pro $\lambda 1=850\text{ nm}$</i>	<i>pro $\lambda 2=1300\text{ nm}$</i>	<i>pro $\lambda 1=850\text{ nm}$</i>	<i>pro $\lambda 2=1300\text{ nm}$</i>
<i>síla F(N)</i>	<i>průměrné hodnoty útlumů (dB)</i>	<i>průměrné hodnoty útlumů (dB)</i>	<i>hodnoty útlumů (db) podle lin.regrese</i>	<i>hodnota útlumu (db) podle lin.regrese</i>
0	0,852	0,94	1,261073529	1,334867647
2	1,226	1,304	1,406297059	1,478235294
4	1,538	1,614	1,551520588	1,621602941
6	1,786	1,848	1,696744118	1,764970588
8	2,002	2,056	1,841967647	1,908338235
10	2,202	2,244	1,987191176	2,051705882
12	2,3	2,358	2,132414706	2,195073529
14	2,432	2,492	2,277638235	2,338441176
16	2,532	2,598	2,422861765	2,481808824
18	2,66	2,724	2,568085294	2,625176471
20	2,752	2,812	2,713308824	2,768544118
22	2,878	2,934	2,858532353	2,911911765
24	2,964	3,012	3,003755882	3,055279412
26	3,03	3,074	3,148979412	3,198647059
28	3,178	3,232	3,294202941	3,342014706
30	3,272	3,32	3,439426471	3,485382353

$\lambda_1=850 \text{ nm}$



Charakteristika útlumů v závislosti na velikosti snímané síly

Příklad výpočtu průměru jednoho bodu:

Souřadnice bodu [10 ; 2,202], kde 10 je hodnota síly F (N) působící na vlákno a 2,202 je hodnota útlumu (dB) vyvolaná touto silou.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} = \frac{2,15 + 2,2 + 2,25 + 2,19 + 2,22}{5} = 2,202 \text{ dB}$$

x - průměrná hodnota,

$x_1 - x_5$ – hodnoty útlumů v měřeních 1 až 5

n = 5 – počet provedených měření senzoru

Odchylky, tolerance chyb

Maximální vyšší odchylka

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_m je maximální vyšší odchylka, b_{\max} – nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_m = |b_{\max} - b_{ideal}| = |2,25 - 1,987191176| \doteq 0,2628dB$$

Maximální nižší odchylka

Rozdíl nejnižší a ideální hodnoty útlumu, kde O_n je maximální nižší odchylka, b_{\min} – nejnižší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_n = |b_{\min} - b_{ideal}| = |0,84 - 1,261073529| \doteq 0,4211dB$$

Po zjištění odchylek určíme toleranci chyb jako součet maximální vyšší odchylky a maximální nižší odchylky.

$$T = O_m + O_n = 0,2628 + 0,4211 = 0,6839dB$$

Absolutní a relativní chyba senzoru :

Absolutní chyba:

$$\Delta = \Delta x_m - \Delta x_{id} = |2,42 - 2,18| = 0,24 \text{ dB}$$

Δ – absolutní chyba senzoru (dB), Δx_m – rozsah hodnot průměrného útlumu (dB), Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu (dB)

Relativní chyba:

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta x_{id}} \cdot 100 = \frac{0,24}{2,18} \cdot 100 = 11\%$$

δ – relativní chyba senzoru v %, Δ – absolutní chyba senzoru, Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu

Citlivost senzoru k

$$k_4 = \frac{\Delta b}{\Delta F} = \frac{2,42}{30} \doteq 0,081dB \cdot N^{-1}$$

Δb – velikost změny útlumu (dB)

ΔF – velikost změny působící síly (N)

Výpočet standardní nejistoty měření typu A

Příklad výpočtu:

$$u_A = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \Sigma(\Delta x_m)^2} =$$

$$= 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} \left[(2,15 - 2,202)^2 + (2,2 - 2,202)^2 + \dots + (2,22 - 2,202)^2 \right]} \doteq 0,0232$$

$$x_{n1} = x_{i1} \pm u_A = 2,202 \pm 0,0232 \text{ dB}$$

u_A – standardní nejistota typu A (dB)

k – koeficient rozšíření

n – počet měření

Δx_m – rozdíl naměřené hodnoty útlumu v 1. až 5. měření a průměrné hodnoty útlumu z těchto 5-ti měření (dB)

x_{n1} – průměrná hodnota útlumu uvedená se standardní nejistotou typu A v 1.bodě měření (dB)

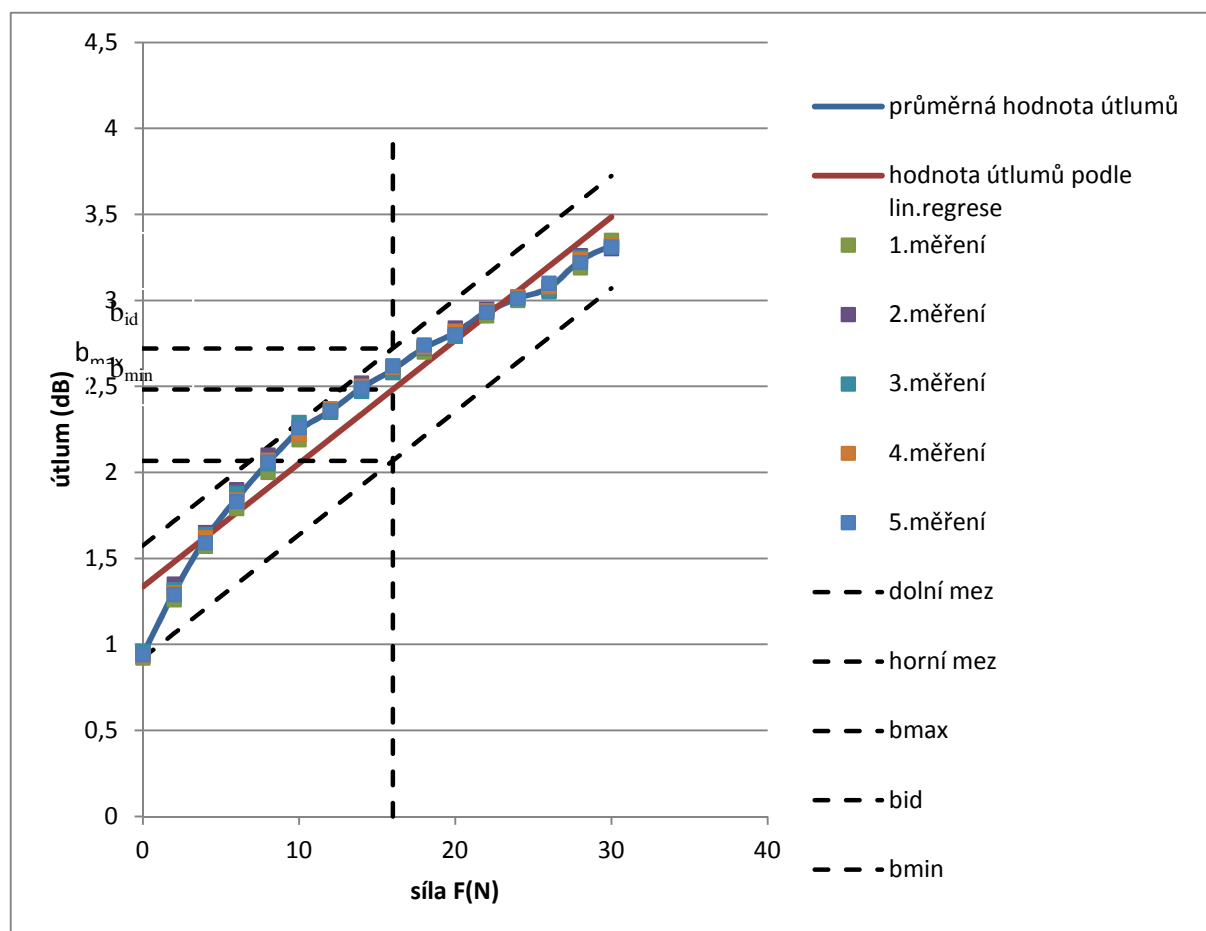
x_{i1} – průměrná hodnota útlumu v 1.bodě měření (dB)

x_{in} – průměrná hodnota útlumu v n – tém bodě měření (dB)

<i>Nejistota typu A (dB)</i>	<i>$x_{in} \pm u_A$ (dB)</i>
0,0052	0,852 \pm 0,0052
0,0191	1,226 \pm 0,0191
0,0179	1,538 \pm 0,0179
0,0260	1,786 \pm 0,0260
0,0190	2,002 \pm 0,0190
0,0232	2,202 \pm 0,0232
0,0044	2,3 \pm 0,0044
0,0093	2,432 \pm 0,0093
0,0052	2,532 \pm 0,0052
0,0063	2,66 \pm 0,0063
0,0185	2,752 \pm 0,0185
0,0082	2,878 \pm 0,0082
0,0071	2,964 \pm 0,0071
0,0099	3,03 \pm 0,0099
0,0179	3,178 \pm 0,0179
0,0082	3,272 \pm 0,0082

Vypočítané hodnoty nejistot v jednotlivých bodech měření

$\lambda_2=1300\text{nm}$



Charakteristika útlumů v závislosti na velikosti snímané síly

Příklad výpočtu průměru jednoho bodu:

Souřadnice bodu [10 ; 2,244], kde 10 je hodnota síly F (N) působící na vlákno a 2,244 je hodnota útlumu (dB) vyvolaná touto silou.

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} = \frac{2,19 + 2,26 + 2,29 + 2,22 + 2,26}{5} = 2,244 \text{ dB}$$

x - průměrná hodnota,

$x_1 - x_5$ – hodnoty útlumů v měřeních 1 až 5

n = 5 – počet provedených měření senzoru

Odchyšky, tolerance chyb

Maximální vyšší odchylka

Rozdíl nejvyšší a ideální hodnoty útlumu, kde O_m je maximální vyšší odchylka, b_{\max} – nejvyšší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_m = |b_{\max} - b_{ideal}| = |2,29 - 2,051705882| \doteq 0,2383dB$$

Maximální nižší odchylka

Rozdíl nejnižší a ideální hodnoty útlumu, kde O_n je maximální nižší odchylka, b_{\min} – nejnižší hodnota útlumu vychýleného od ideální křivky a b_{ideal} – ideální hodnota útlumu.

$$O_n = |b_{\min} - b_{ideal}| = |0,92 - 1,334867647| \doteq 0,4149dB$$

Po zjištění odchylek určíme toleranci chyb jako součet maximální vyšší odchylky a maximální nižší odchylky.

$$T = O_m + O_n = 0,2383 + 0,4149 = 0,6532dB$$

Absolutní a relativní chyba senzoru pro $\lambda_2 = 1300nm$:

Absolutní chyba:

$$\Delta = \Delta x_m - \Delta x_{id} = |2,38 - 2,15| = 0,23dB$$

Δ – absolutní chyba senzoru (dB), Δx_m – rozsah hodnot průměrného útlumu (dB), Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu (dB)

Relativní chyba:

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta x_{id}} \cdot 100 = \frac{0,23}{2,15} \cdot 100 = 10,7\%$$

δ – relativní chyba senzoru v %, Δ – absolutní chyba senzoru, Δx_{id} – rozsah hodnot ideálního útlumu

Citlivost senzoru k

$$k_4 = \frac{\Delta b}{\Delta F} = \frac{2,38}{30} \doteq 0,08dB \cdot N^{-1}$$

Δb – velikost změny útlumu (dB)

ΔF – velikost změny působící síly (N)

Výpočet standardní nejistoty měření typu A

Příklad výpočtu:

$$u_A = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum (\Delta x_m)^2} =$$

$$= 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} \left[(2,19 - 2,244)^2 + (2,26 - 2,244)^2 + \dots + (2,26 - 2,244)^2 \right]} \doteq 0,023$$

$$x_{n1} = x_{i1} \pm u_A = 2,244 \pm 0,023 \text{ dB}$$

u_A – standardní nejistota typu A (dB)

k – koeficient rozšíření

n – počet měření

Δx_m – rozdíl naměřené hodnoty útlumu v 1. až 5. měření a průměrné hodnoty útlumu z těchto 5-ti měření (dB)

x_{n1} – průměrná hodnota útlumu uvedená se standardní nejistotou typu A v 1.bodě měření (dB)

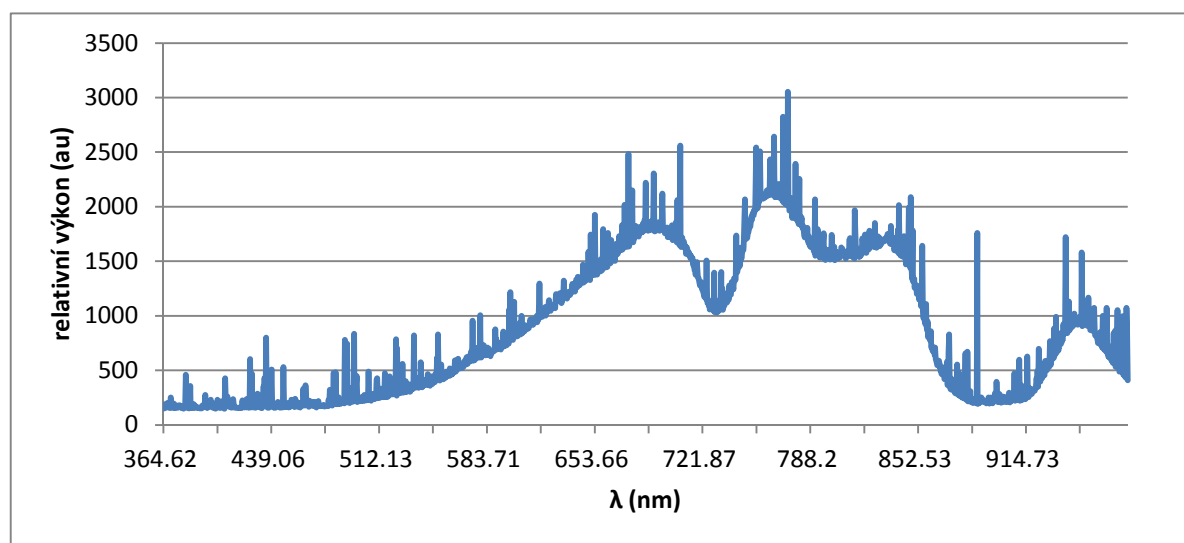
x_{i1} – průměrná hodnota útlumu v 1.bodě měření (dB)

x_{in} – průměrná hodnota útlumu v n – tém bodě měření (dB)

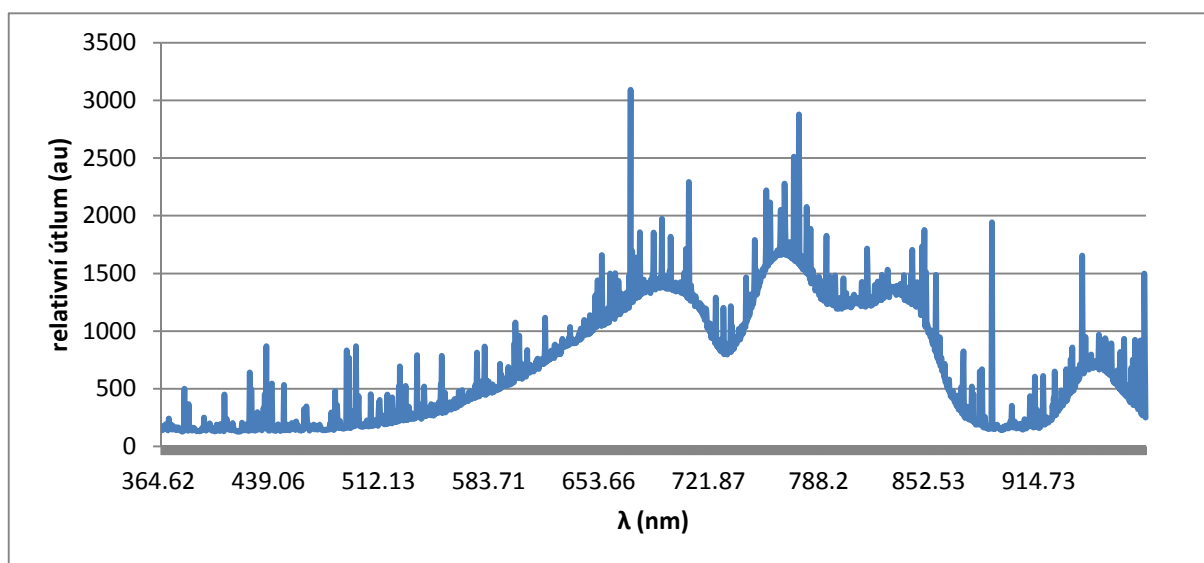
<i>Nejistota typu A</i> (dB)	$x_{in} \pm u_A$ (dB)
0,0099	0,94 ± 0,0099
0,0210	1,304 ± 0,0210
0,0210	1,614 ± 0,0210
0,0271	1,848 ± 0,0271
0,0228	2,056 ± 0,0228
0,0230	2,244 ± 0,0230
0,0052	2,358 ± 0,0052
0,0120	2,492 ± 0,0120
0,0112	2,598 ± 0,0112
0,0095	2,724 ± 0,0095
0,0120	2,812 ± 0,0120
0,0095	2,934 ± 0,0095
0,0052	3,012 ± 0,0052
0,0122	3,074 ± 0,0122
0,0174	3,232 ± 0,0174
0,0117	3,32 ± 0,0117

Vypočítané hodnoty nejistot v jednotlivých bodech měření

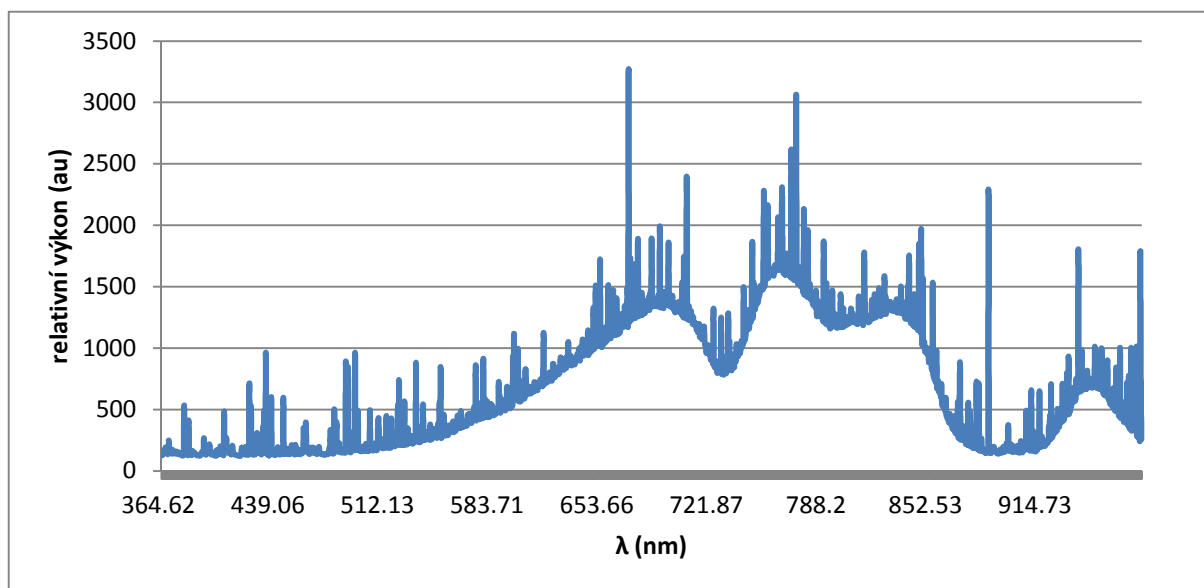
Příloha B: naměřené hodnoty VOS pro snímání vysokých teplot



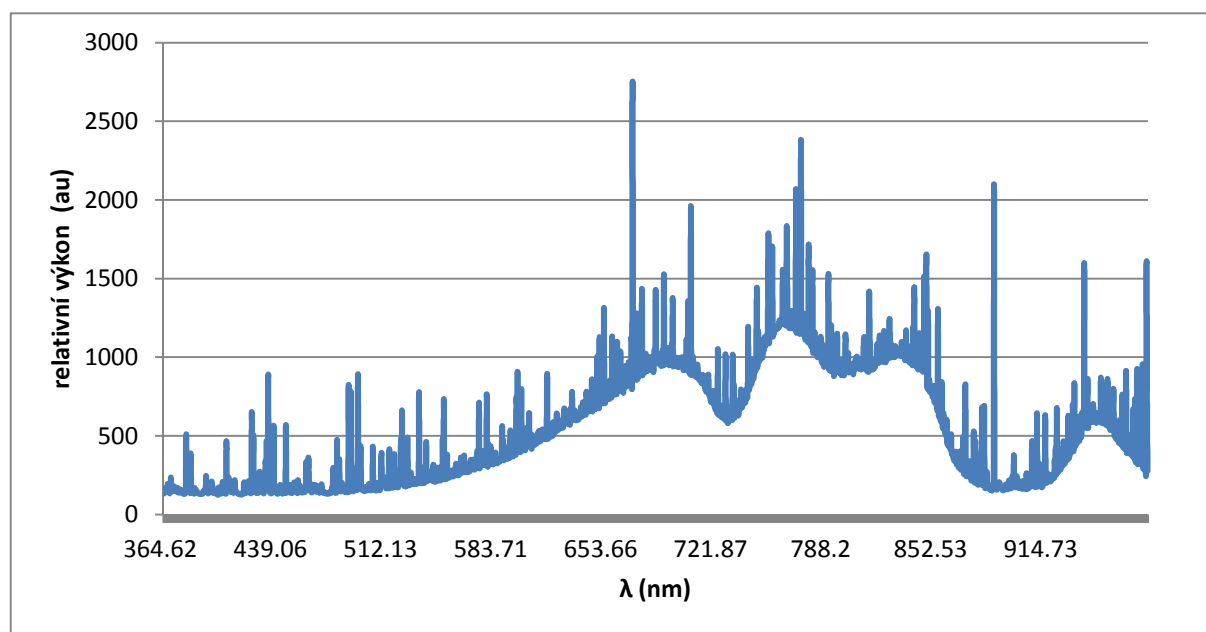
Spektrální charakteristika 1.měření při teplotě 1135°C



Spektrální charakteristika 2.měření při teplotě 1135°C



Spektrální charakteristika 3.měření při teplotě 1135°C



Spektrální charakteristika 4.měření při teplotě 1135°C